

看图识电子系列丛书

看图识电子电路图

门 宏 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是“看图识电子系列丛书”中的一本。全书共分10章,通过实例并借助大量插图,用通俗易懂的语言详细讲解电路图的基本概念、电路图的结构和绘图规则、各种元器件与集成电路的符号和作用、看电路图的基本方法和技巧、单元电路的分析方法、整机电路的分析方法和技巧等。

本书适合广大电子技术爱好者、家电维修人员和相关行业从业人员阅读学习,并可作为职业技术学校 and 务工人员上岗培训的基础教材。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

看图识电子电路图 / 门宏编著. —北京: 电子工业出版社, 2011. 1
(看图识电子系列丛书)
ISBN 978-7-121-12110-4

I. ①看… II. ①门… III. ①电子电路—识图法 IV. ①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第207937号

责任编辑: 富 军

印 刷:

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本: 880×1230 1/32 印张: 10.875 字数: 302千字

印 次: 2011年1月第1次印刷

印 数: 4000册 定价: 25.00元

凡所购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。
若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至
dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言

“看图识电子系列丛书”是专为电子技术初学者量身打造的入门宝典。丛书的编著宗旨是让初学者一看就懂、一学就会、一做就成。丛书将以其“看图识字”式的特色，助您轻松入门。

“看图识电子系列丛书”系统地介绍了电子元器件、电子电路图、电子小制作、识用万用表等电子技术基本知识和实用技能。在内容上精心编排，重点介绍实用技术，详细讲解操作步骤，特别突出操作技巧，避开了令初学者望而生畏的繁冗的理论阐述。在形式上以图为主，文字精练，形象直观，易看易懂，深入浅出，实用性强，真正起到手把手教你快速学会电子技术的效果。

《看图识电子电路图》是该系列丛书中的一本。全书共分 10 章，内容包括电路图的基本概念、电路图的结构和绘图规则、各种元器件与集成电路的符号和作用、看电路图的基本方法和技巧、单元电路的分析方法、整机电路的分析方法和技巧等。文中配有大量插图，用通俗易懂的语言详细讲解，并举例说明。

本书由门宏编著，参加编写的还有施鹏、门雁菊、张元景、吴敏、李扣全、吴卫星。本书适合广大电子技术爱好者、家电维修人员和相关行业从业人员阅读学习，并可作为职业技术学校和务工人员上岗培训的基础教材。书中如有不当之处，欢迎广大读者朋友批评指正。

编著者

目 录

第 1 章 电子的路线图——电路图	1
1.1 不同侧面看电路——电路图的种类	2
1.1.1 元器件连接图——电路原理图	2
1.1.2 功能结构图——方框图	3
1.1.3 电路安装图——电路板图	3
1.1.4 写实的电路图——实物图	4
1.2 符号和字符的集成——电路图的组成	5
1.2.1 电路图图形符号	5
1.2.2 电路图中的文字符号	7
1.2.3 电路图中的注释性字符	7
1.2.4 元器件数值的标注方法	8
1.2.5 电路图中的轮廓与连接符号	10
1.2.6 电路图中的限定符号	11
1.2.7 导线与接地的符号	13
第 2 章 约定俗成——电路图的绘图规则	16
2.1 连接线的绘图规则	17
2.1.1 导线的连接与交叉	18
2.1.2 连接导线的简化画法	18
2.1.3 连接导线的中断画法	18
2.1.4 非电连接的表示方法	19
2.2 电源线与地线的绘图规则	19
2.2.1 电源线与地线的安排	19
2.2.2 电源线与地线的分散表示法	20
2.2.3 集成电路的电源线与地线	21
2.3 图形符号的位置与状态	21

2.3.1	图形符号的方位	21
2.3.2	集中画法与分散画法	22
2.3.3	操作性器件的状态	23
第3章	基本元件的符号及其在电路图中的作用	24
3.1	电阻器与电位器的符号和作用	25
3.1.1	电阻器与电位器的符号	26
3.1.2	电阻器的作用	27
3.1.3	热敏电阻器的作用	28
3.1.4	光敏电阻器的作用	30
3.1.5	压敏电阻器的作用	31
3.1.6	电位器的作用	31
3.2	电容器的符号和作用	33
3.2.1	电容器的符号	34
3.2.2	电容器的作用	35
3.2.3	可变电容器的作用	39
3.3	电感器的符号和作用	40
3.3.1	电感器的符号	40
3.3.2	电感器的作用	41
3.4	变压器的符号和作用	43
3.4.1	变压器的符号	44
3.4.2	电源变压器的作用	45
3.4.3	音频变压器的作用	47
3.4.4	中频变压器的作用	48
3.4.5	高频变压器的作用	49
第4章	半导体管的符号及其在电路图中的作用	51
4.1	晶体二极管的符号和作用	52
4.1.1	晶体二极管的符号	52
4.1.2	晶体二极管的作用	53
4.2	稳压二极管的符号和作用	56
4.2.1	稳压二极管的符号	57

4.2.2	稳压二极管的作用	57
4.3	晶体三极管的符号和作用	59
4.3.1	晶体三极管的符号	60
4.3.2	晶体三极管的作用	60
4.4	场效应管的符号和作用	64
4.4.1	场效应管的符号	65
4.4.2	场效应管的作用	66
4.5	单结晶体管的符号和作用	70
4.5.1	单结晶体管的符号	70
4.5.2	单结晶体管的作用	71
4.6	晶体闸流管的符号和作用	74
4.6.1	晶体闸流管的符号	74
4.6.2	晶体闸流管的作用	75
第5章	集成电路的符号及其在电路图中的作用	80
5.1	集成运算放大器的符号和作用	81
5.1.1	集成运算放大器的符号	81
5.1.2	集成运算放大器的作用	82
5.2	常用集成稳压器的符号和作用	86
5.2.1	集成稳压器的符号	87
5.2.2	集成稳压器的作用	87
5.3	时基集成电路的符号和作用	91
5.3.1	时基集成电路的符号	91
5.3.2	时基集成电路的作用	92
5.4	数字电路的符号和作用	96
5.4.1	数字电路的符号	96
5.4.2	门电路的作用	104
5.4.3	触发器的作用	108
5.4.4	计数器的作用	115
5.4.5	译码器的作用	119
5.4.6	移位寄存器的作用	122

第 6 章	换能器件的符号及其在电路图中的作用	127
6.1	光电器件的符号和作用	128
6.1.1	光电器件的符号	128
6.1.2	光电二极管的作用	129
6.1.3	光电三极管的作用	131
6.1.4	光电耦合器的作用	133
6.1.5	发光二极管的作用	134
6.1.6	LED 数码管的作用	137
6.2	电声器件的符号和作用	139
6.2.1	电声器件的符号	139
6.2.2	扬声器的作用	140
6.2.3	耳机的作用	142
6.2.4	讯响器的作用	143
6.2.5	传声器的作用	145
第 7 章	其他器件的符号及其在电路图中的作用	148
7.1	控制器件的符号和作用	149
7.1.1	控制器件的符号	149
7.1.2	开关的作用	153
7.1.3	继电器的作用	156
7.2	保护器件的符号和作用	160
7.2.1	保护器件的符号	160
7.2.2	熔断器的作用	160
7.3	指示器件的符号和作用	164
7.3.1	指示器件的符号	164
7.3.2	信号器件的作用	166
7.3.3	测量仪表的作用	167
第 8 章	掌握特点——巧看集成电路图	168
8.1	集成电路的基本看图方法与技巧	169
8.1.1	了解集成电路的基本功能	169
8.1.2	识别集成电路的引脚	171
8.1.3	从集成电路的输入/输出关系上分析	178



8.1.4	从集成电路的接口关系上分析	181
8.2	数字电路的基本看图方法与技巧	182
8.2.1	掌握数字电路的引脚特征	182
8.2.2	数字电路图的一般分析方法	190
8.2.3	组合逻辑电路的分析方法	192
8.2.4	时序逻辑电路的分析方法	195
第9章	解剖麻雀——巧看单元电路	200
9.1	单元电路的基本看图方法与技巧	201
9.1.1	了解单元电路的作用与功能	201
9.1.2	分析输入与输出的关系	202
9.1.3	单元电路的结构特点	204
9.1.4	等效电路分析法	206
9.2	电压放大电路分析技巧	208
9.2.1	单管电压放大电路	208
9.2.2	双管电压放大电路	212
9.2.3	具有负反馈的电压放大电路	214
9.2.4	集成运放电压放大电路	218
9.2.5	电压跟随器	219
9.3	功率放大电路分析技巧	223
9.3.1	单管功率放大器	223
9.3.2	双管推挽功率放大器	225
9.3.3	OTL 功率放大器	230
9.3.4	OCL 功率放大器	235
9.3.5	BTL 功率放大器	236
9.4	正弦波振荡器电路分析技巧	239
9.4.1	变压器耦合振荡器	240
9.4.2	三点式振荡器	241
9.4.3	晶体振荡器	245
9.4.4	RC 振荡器	247
9.5	多谐振荡器电路分析技巧	250

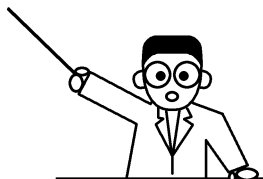
9.5.1	门电路构成的多谐振荡器	250
9.5.2	时基电路构成的多谐振荡器	252
9.5.3	单结晶体管构成的多谐振荡器	254
9.5.4	施密特触发器构成的多谐振荡器	256
9.6	整流滤波电路分析技巧	256
9.6.1	整流电路	257
9.6.2	滤波电路	262
9.6.3	负压整流电路	267
9.6.4	倍压整流电路	269
9.7	稳压电路分析技巧	271
9.7.1	简单稳压电路	272
9.7.2	串联型稳压电路	274
9.7.3	采用集成稳压器的稳压电路	278
第10章	融会贯通——看懂整机电路图	282
10.1	看懂整机电路图的基本方法与步骤	283
10.1.1	宏观掌控——了解电路整体功能	283
10.1.2	确定方向——判断电路图走向	284
10.1.3	化整为零——分解电路图	287
10.1.4	重点分析——主通道电路	288
10.1.5	深入分析——辅助电路	289
10.1.6	不可忘记——分析直流供电电路	289
10.1.7	各个击破——具体分析各单元电路	290
10.2	怎样看自动调频收音机电路图	290
10.2.1	电路结构与整机工作原理分析	290
10.2.2	调频接收放大与鉴频电路分析	292
10.2.3	立体声解码电路分析	293
10.2.4	音频功率放大器电路分析	294
10.3	怎样看开关稳压电源电路图	295
10.3.1	电路图总体分析	295
10.3.2	电源噪声滤波器电路分析	298

10.3.3	三端开关电源集成电路分析·····	298
10.3.4	脉宽调制电路分析·····	299
10.3.5	高频整流滤波电路分析·····	300
10.4	怎样看音频信号注入/寻迹器电路图·····	301
10.4.1	整机电路图分析·····	301
10.4.2	信号寻迹器电路分析·····	303
10.4.3	信号注入器电路分析·····	305
10.4.4	直流供电回路分析·····	307
10.5	怎样看电子镇流器电路图·····	307
10.5.1	电路原理总体分析·····	308
10.5.2	市电直接整流电路分析·····	310
10.5.3	高压高频振荡器电路分析·····	311
10.5.4	谐振启辉电路分析·····	313
10.6	怎样看外置频谱显示器电路图·····	313
10.6.1	电路图总体分析·····	314
10.6.2	有源带通滤波器电路分析·····	316
10.6.3	电压比较器电路分析·····	317
10.6.4	集成电平表驱动电路分析·····	318
10.7	怎样看数字抢答器电路图·····	319
10.7.1	电路原理总体分析·····	319
10.7.2	第一信号鉴别电路分析·····	322
10.7.3	发光指示电路分析·····	324
10.7.4	复位电路分析·····	324
10.7.5	声音提示电路分析·····	324
10.8	怎样看模拟环绕声处理器电路图·····	325
10.8.1	整机电路分析·····	326
10.8.2	集成运放电压跟随器电路分析·····	329
10.8.3	减法器与加法器电路分析·····	330
10.8.4	集成运放反相器电路分析·····	333
10.8.5	直流供电电路分析·····	333

第 1 章

电子的路线图——电路图

-  1.1 不同侧面看电路——电路图的种类
-  1.2 符号和字符的集成——电路图的组成



看图识电子电路图



要看懂电路图，首先要了解电路图。什么是电路图，简单地说，电路图就是电子运动的路线图。电子按照电路图规定的路线行走，便可以实现各种电路的不同功能。要认识和看懂电路图，首先要对电路图的基本概念有所了解，本章就和大家谈谈电路图的基本概念。



1.1 不同侧面看电路——电路图的种类

就像地图有行政区划图、地形图、交通路线图等不同种类一样，电路图也有若干种类，以适应不同场合的需要。通常所说的电路图是指电路原理图，广义的电路图概念还包括方框图、电路板图和实物图等，如图 1-1 所示。

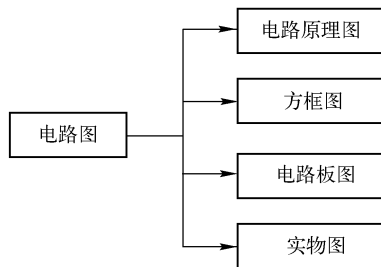


图 1-1 电路图的种类



1.1.1 元器件连接图——电路原理图

电路原理图是一种反映电子设备中各元器件的电气连接情况的图纸。电路原理图由各种符号、线条和字符按照一定的规则组合而成，是电子制作和维修的最重要的依据。通过电路原理图，我们可以详细了解电子设备的电路结构、工作原理和接线方法，还可以进行定量的计算分析和研究。例如，图 1-2 为调频无线话筒电路原理图，用抽象的符号反映出调频无线话筒的电路结构与工作原理。

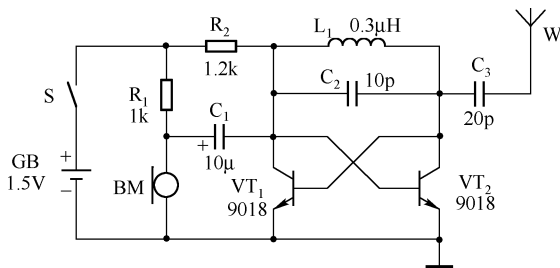


图 1-2 调频无线话筒电路原理图

1.1.2 功能结构图——方框图

方框图是一种概括地反映电子设备的电路结构与功能的图纸。方框图由方框、线条和说明文字组成。例如，图 1-3 为调频无线话筒方框图。方框图简明地反映出电子设备的电路结构和电路功能，有助于我们从整体上了解和研究电路原理。

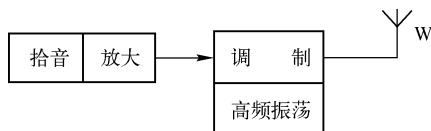


图 1-3 调频无线话筒方框图

1.1.3 电路安装图——电路板图

电路板图是一种反映电路板上元器件安装位置和布线结构的图纸。电路板图由写实性的电路板线路、相应位置上的元器件符号和注释字符等组成。例如，图 1-4 为调频无线话筒电路板图。电路板图是根据电路原理图设计绘制的实际安装图，标明各元器件在电路板上的安装位置，为实际制作和维修提供很大的方便。

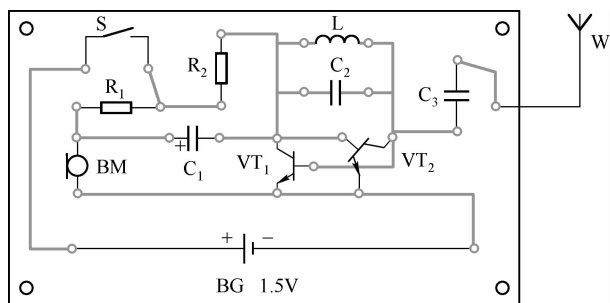


图 1-4 调频无线话筒电路板图



1.1.4 写实的电路图——实物图

实物图由写实的元器件图形和连接线条等组成，是一种用实物图形形象地表示电路原理图的图纸，可以帮助初学者较好、较快地理解电路图。例如，图 1-5 为调频无线话筒实物图，形象地反映出调频无线话筒各元器件的连接关系。

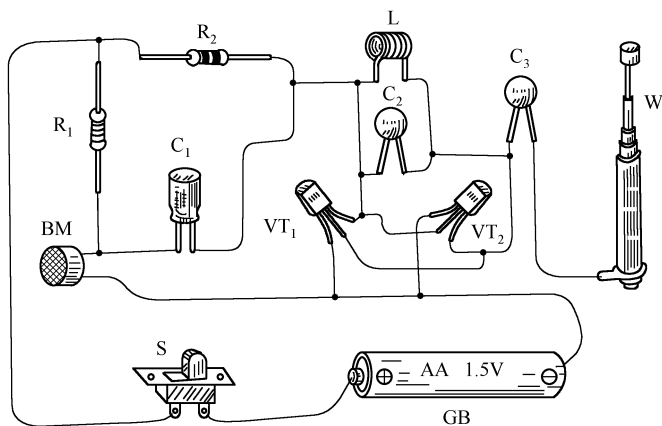


图 1-5 调频无线话筒实物图






1.2 符号和字符的集成——电路图的组成

一张完整的电路图是由若干要素构成的。这些要素主要包括图形符号、文字符号、连线及注释性字符等。下面我们通过如图 1-2 所示的调频无线话筒电路原理图做进一步的说明。



1.2.1 电路图图形符号

图形符号是指用规定的抽象图形代表各种元器件、组件、电流、电压、波形、导线和连接状态等的绘图符号。

图形符号是构成电路图的主体。在如图 1-2 所示调频无线话筒电路原理图中,各种图形符号代表了组成调频无线话筒的各个元器件。例如,小长方形“”表示电阻器,两道短杠“”表示电容器,连续的半圆形“”表示电感器等。各个元器件图形符号之间用连线连接起来,就可以反映出调频无线话筒的电路结构,即构成了调频无线话筒的电路图。

组成电路图的图形符号可以分为两大类:一类是元器件和组件符号;另一类是绘图符号。这些符号是绘制和解读电路图的基础语言,由有关的国家标准予以统一规定,熟悉并牢记这些电路图的图形符号,是看懂电路图的基础。

(1) 元器件的图形符号包括电阻器、电容器、电感器和压电晶体等基本元件的符号,半导体二极管、晶体闸流管、晶体管、场效应管、光电器件、电子管、显像管和显示器件等半导体管和电子管类元器件的符号,电机、变压器、变流器、电池、电声器件、磁头和天线等换能器件的符号,开关和触点、继电器、熔断器、避雷器、接插件、测量仪表和信号器件等控制、保护与指示器件的符号,以及集成电路和数字电路的符号等,如图 1-6 所示。

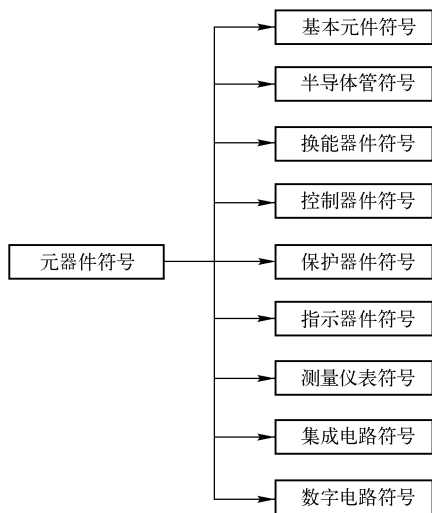


图 1-6 元器件符号的种类

(2) 绘图符号包括导线、波形、连接、接地、限定、轮廓、电压和电流的种类、运动和流动方向的符号等，如图 1-7 所示。

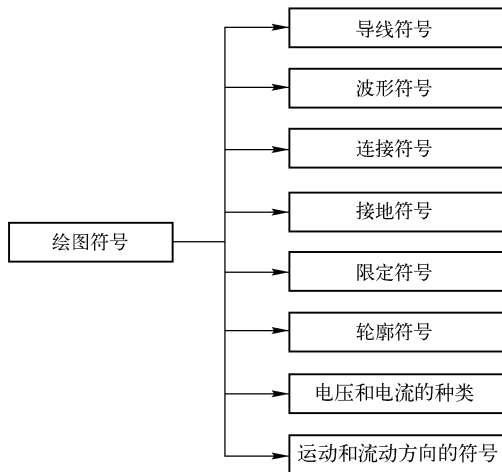


图 1-7 绘图符号的种类



1.2.2 电路图中文字符号

文字符号是指用规定的字符（通常为字母）来表示各种元器件、组件、设备装置、物理量和工作状态等的符号。

文字符号是构成电路图的重要组成部分。为了进一步强调图形符号的性质，同时也为了分析、理解和阐述电路图的方便，在各个元器件的图形符号旁，标注有该元器件的文字符号。例如，在如图 1-2 所示调频无线话筒电路原理图中，文字符号“R”表示电阻器，“C”表示电容器，“L”表示电感器，“VT”表示晶体管等。在一张电路图中，相同的元器件往往会有许多个，这也需要用文字符号将它们加以区别，一般是在该元器件文字符号的后面加上序号。例如，在如图 1-2 所示中，电阻器有两个，分别以“ R_1 ”、“ R_2 ”表示；电容器有 3 个，分别标注为“ C_1 ”、“ C_2 ”、“ C_3 ”；晶体管有两个，分别标注为“ VT_1 ”、“ VT_2 ”；等等。

1.2.3 电路图中文注释性字符

注释性字符是指电路图中对图形符号和文字符号做进一步说明的字符。注释性字符也是构成电路图的重要组成部分。

注释性字符用来说明元器件的数值大小或者具体型号，通常标注在图形符号和文字符号的旁边。例如，在如图 1-2 所示调频无线话筒电路原理图中，通过注释性字符即可以知道，电阻器 R_1 的数值为 $1k\Omega$ ， R_2 的数值为 $1.2k\Omega$ ；电容器 C_1 的数值为 $10\mu F$ ， C_2 的数值为 $10pF$ ， C_3 的数值为 $20pF$ ；晶体管 VT_1 、 VT_2 的型号均为 9018；等等。

注释性字符还用于电路图中其他需要说明的场合。由此可见，注释性字符是分析电路工作原理，特别是定量地分析研究电路的工作状态所不可缺少的。



1.2.4 元器件数值的标注方法

电路图中元器件的数值一般用简略的形式直接标注在元器件符号旁边。元器件的数值包括数量和计量单位两部分，其中数量部分由阿拉伯数字和表示倍数的词头字母组成，计量单位为字母符号。

(1) 电阻值的标注方法

电阻器和电位器阻值的基本计量单位是“欧姆”，简称“欧”，用字母“ Ω ”表示。常用单位还有“千欧”（ $k\Omega$ ）和“兆欧”（ $M\Omega$ ），它们之间的换算关系是： $1M\Omega = 1000k\Omega$ ， $1k\Omega = 1000\Omega$ 。

电路图中标注电阻值时一般可省略单位符号“ Ω ”。例如， 5.1Ω 的电阻器可标注为“ 5.1Ω ”，也可标注为“ 5.1 ”或“ $5R1$ ”； $6.8k\Omega$ 的电阻器可标注为“ $6.8k$ ”或“ $6k8$ ”； $1M\Omega$ 的电阻器可标注为“ $1M$ ”；如图 1-8 所示。

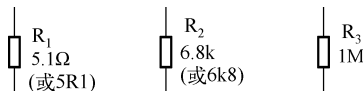


图 1-8 电阻器的标注方法

对于可变电阻器，电路图中所标注的是其最大阻值。如图 1-9 所示，“ $10k$ ”表示该可变电阻器的最大阻值为 $10k\Omega$ 。

对于电位器，电路图中所标注的是其固定两端间的阻值。如图 1-10 所示，“ $4.7k$ ”表示该电位器上下两固定引出端之间的阻值为 $4.7k\Omega$ 。

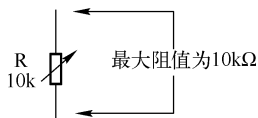


图 1-9 可变电阻器的标注方法

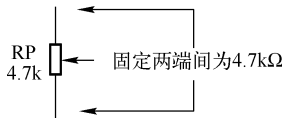


图 1-10 电位器的标注方法



(2) 电容量的标注方法

电容器容量的基本计量单位是“法拉”，简称“法”，用字母“F”表示。由于“法拉”作为单位在实际运用中往往显得太大，所以常用“微法”（ μF ）、“纳法”（ nF ，也称为“毫微法”）和“皮法”（ pF ，也称为“微微法”）作为单位。它们之间的换算关系是： $1\text{F} = 10^6\mu\text{F}$ ， $1\mu\text{F} = 1000\text{nF}$ ， $1\text{nF} = 1000\text{pF}$ 。

电路图中标注电容量时一般省略单位符号“F”，对于 pF 级的电容器，标注时往往还省略“p”，对于纯小数的 μF 级的电容器，标注时也有省略“ μ ”的情况。例如， 100pF 的电容器可标注为“100p”或“100”； $0.01\mu\text{F}$ 的电容器可标注为“0.01 μ ”或“0.01”； $2.2\mu\text{F}$ 的电容器可标注为“2.2 μ ”或“2 μ 2”； $47\mu\text{F}$ 的电容器可标注为“47 μ ”；如图 1-11 所示。

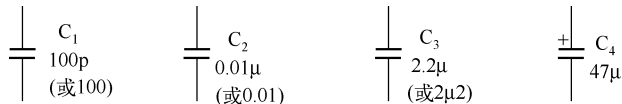


图 1-11 电容器的标注方法

对于可变电容器和微调电容器，通常标注出其最大容量，也有标注出其最小/最大容量的。例如，图 1-12 (a) 表示可变电容器 C_1 的最大容量为 270pF ，图 1-12 (b) 表示可变电容器 C_2 的容量范围为 $7 \sim 270\text{pF}$ 。

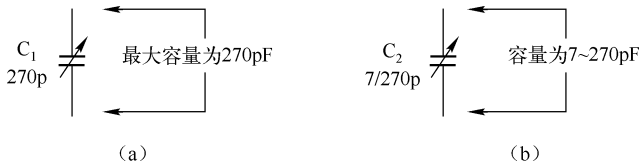


图 1-12 可变电容器的标注方法

(3) 电感量的标注方法

电感器电感量的基本单位是“亨利”，简称“亨”，用字母“H”表示。在实际应用中，一般常用“毫亨”（ mH ）或“微



亨”(μH) 作为单位。它们之间的换算关系是： $1\text{H} = 1000\text{mH}$ ， $1\text{mH} = 1000\mu\text{H}$ 。

电路图中标注电感量时通常直接写明，如 1.5mH 的电感器标注为“ 1.5mH ”； $3\mu\text{H}$ 的电感器标注为“ $3\mu\text{H}$ ”；如图 1-13 所示。

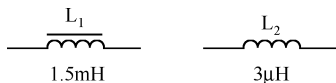


图 1-13 电感器的标注方法

对于带磁心连续可调的电感器，电路图中标注的一般是其中间电感量。如图 1-14 所示，“ 0.3mH ”表示该可调电感器的中间电感量为 0.3mH ，并可在一定范围内调节大小。

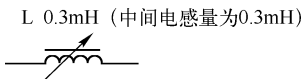


图 1-14 可调电感器的标注方法

1.2.5 电路图中的轮廓与连接符号

轮廓与连接符号是电路图绘图符号的重要组成部分。轮廓与连接符号包括轮廓线、边界线、屏蔽、非电的连接等，具体见表 1-1。

表 1-1 轮廓与连接符号

图形符号	说 明
	元件、装置、功能单元的轮廓
	外壳（容器）、管壳
	边界线
	屏蔽（护罩） 注：可画成任何方便形状



续表

图 形 符 号	说 明
-----	机械、气动、液压的连接
----->	具有指示方向的机械连接
----->	具有指示旋转方向的机械连接

▶▶ 1.2.6 电路图中的限定符号

限定符号也是电路图绘图符号的重要组成部分。常用的限定符号有电压和电流的种类、运动和流动的方向、信号的波形等，分别见表1-2、表1-3和表1-4。

表 1-2 电压和电流种类的符号

图 形 符 号	说 明
——	直流（文字符号为 DC）
==	直流 注：在上一符号可能引起混乱时用本符号
~	交流（文字符号为 AC）
~	低频（工频或亚音频）
~	中频（音频）
~	高频（超高频、载频或射频）
~	交直流
~	具有交流分量的整流电流
N	中性（中性线）
M	中间线
+	正极
-	负极



表 1-3 运动和流动方向的符号

图 形 符 号	说 明
	按箭头方向的直线运动或力
	双向直线的运动或力
	按箭头的方向单向旋转（示出顺时针方向）
	双向旋转
	两个方向都有限制的双向旋转
	往复运动
	能量、信号的单向传播（单向传输）
	同时双向传播（同时双向传输），同时发送和接收
	不同时双向传播，交替的发送和接收

表 1-4 信号波形的符号

图 形 符 号	说 明
	正脉冲
	负脉冲
	交流脉冲
	正阶跃
	负阶跃
	锯齿波
	非电离的电磁辐射（无线电波、可见光等）
	非电离的相干辐射
	电离电磁辐射



1.2.7 导线与接地的符号

导线和接地也是电路图绘图符号的重要组成部分。导线及其连接的常用符号见表1-5，接地等符号见表1-6。

表1-5 导线及其连接的常用符号

图 形 符 号	说 明
	导线
	导线组 (示例为3根导线)
	导线组 (示例为3根导线)
	柔软导线
	屏蔽导线
	绞合导线 (示出2股)
	同轴对、同轴电缆
	同轴对连接到端子
	屏蔽同轴对、屏蔽同轴电缆
	导线的连接点
	导线的连接
	导线的连接
	导线的多线连接
	导线的交叉连接
	导线的交叉连接单线表示法 (示出3×3线)
	导线的交叉连接多线表示法 (示出3×3线)



续表

图 形 符 号	说 明
	导线或电缆的分支和合并
	导线的不连接（跨越）
	导线的不连接单线表示法（示出 2 × 3 线）
	导线的不连接多线表示法（示出 2 × 3 线）

表 1-6 接地等符号

图 形 符 号	说 明
	接地，一般符号
	无噪声接地（抗干扰接地）
	保护接地
	接机壳或接底板
	接机壳或接底板
	等电位
	故障（用以表示假定故障位置）
	击穿
	导线间绝缘击穿






续表

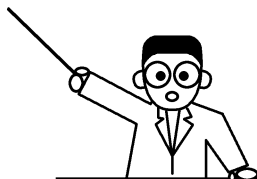
图 形 符 号	说 明
	导线对机壳绝缘击穿
	导线对地绝缘击穿
	永久磁铁
	测试点指示



第 2 章

约定俗成——电路图的 绘图规则

-  2.1 连接线的绘图规则
-  2.2 电源线与地线的绘图规则
-  2.3 图形符号的位置与状态



看图识电子电路图

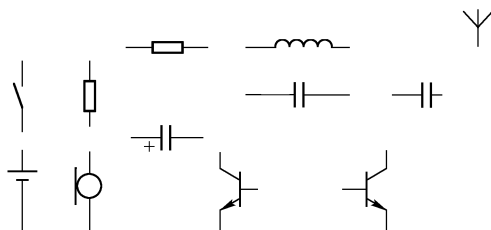


就像地图规定上北下南、左东右西一样，电路图也有约定俗成的绘图规则。电路图中除了必须使用统一规定的图形符号和文字符号外，还应遵循这些绘图规则。这一方面是为了能够准确清晰地表达电子设备的电路结构；另一方面是为了使看图者能够方便正确地理解电路图的全部内容。

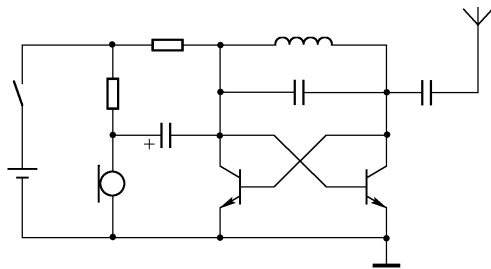


2.1 连接线的绘图规则

连接线是电路图中必不可少的组成要素。如果没有连接线，则各个元器件符号将呈现孤零零的散布状态。正是连接线将各个孤立的元器件符号有机连接起来，才成为电路图，如图 2-1 所示。连接线的主要绘图规则包括导线的连接与交叉、连接线的简化画法和中断画法、非电连接的表示方法等。



(a) 没有连接线时



(b) 有连接线时

图 2-1 电路图中连接线的作



2.1.1 导线的连接与交叉

元器件之间的连接导线在电路图中用实线表示。导线的连接与交叉的画法如图 2-2 所示。图 2-2 (a) 为在横竖两导线交点处画有一圆点，表示两导线连接在一起；图 2-2 (b) 为在两导线交点处无圆点，表示两导线交叉而不连接。

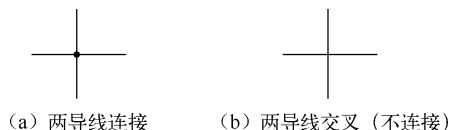


图 2-2 导线的连接与交叉

2.1.2 连接导线的简化画法

连接导线也可以用简化的画法。例如，在如图 2-3 所示电路中，在 IC_1 与 IC_2 之间的连线上画有 3 道小斜杠，表示这里有 3 条导线分别将 IC_1 与 IC_2 的 A 与 A、B 与 B、C 与 C 连接在一起，而这 3 条导线之间并不互相连接。

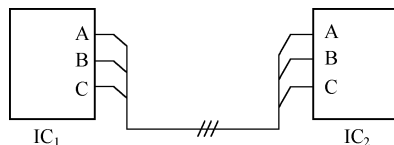


图 2-3 连接导线的简化画法

2.1.3 连接导线的中断画法

当连接导线的两端相距较远、中间相隔较多的图形区域时，可以采用中断加标记的画法。例如，在如图 2-4 所示电路中， IC_1 的 B 端与 IC_2 的 G 端之间的连接导线采用了中断画法，并在中断的两端标注有相同的标记“a”，分析电路图时应理解为两



个“a”端之间有一条连接导线。

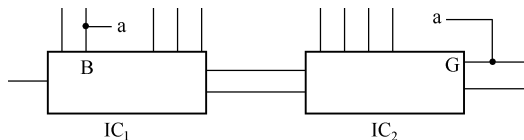


图 2-4 连接导线的中断画法

2.1.4 非电连接的表示方法

某些元器件之间如果具有非电的（如机械的）联系，则用虚线在电路图上表示出来。例如，在如图 2-5 所示收音机电路图中，虚线将电位器 RP 与开关 S 联系起来，表示电源开关 S 受音量电位器 RP 的旋轴控制，它们是一个联动的带开关电位器。

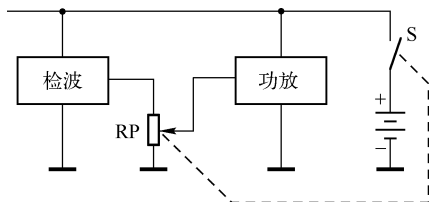


图 2-5 非电连接的表示方法



2.2 电源线与地线的绘图规则

电源线与地线的绘图规则主要是指电源线与地线的安排、电源线与地线的分散表示法，以及集成电路的电源线与地线的习惯表示方法等。

2.2.1 电源线与地线的安排

电路图中通常将电源线或双电源中的正电源引线安排在元器件的上方，将地线或双电源中的负电源引线安排在元器件的下方，如图 2-6 所示。

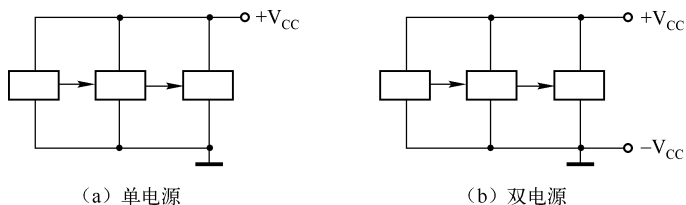


图 2-6 电源线与地线的一般安排

在大多数情况下接地符号是向下引出的，但有时出于绘图布局上的需要，接地符号也可以向上、向左或向右引出，如图 2-7 所示。

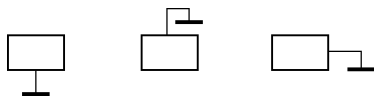


图 2-7 地线的特殊安排

2.2.2 电源线与地线的分散表示法

为了绘图的方便，较复杂的电路图中往往不将所有地线连在一起，而代之以一个个孤立的接地符号，如图 2-8 (a) 所示；理解为所有地线符号是连接在一起的，如图 2-8 (b) 所示。有些电路图中的电源线也采用这种分散表示的画法，应理解为所有标示相同的电源线都是连接在一起的，如图 2-9 所示，所有标示“+9V”的电源线应理解为都是连接在一起的。

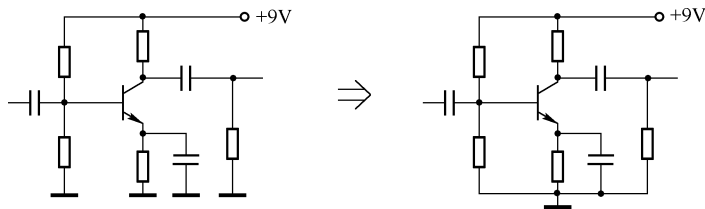


图 2-8 地线的分散表示法

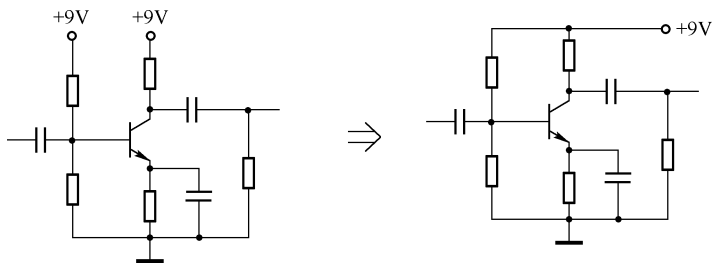


图 2-9 电源线的分散表示法

2.2.3 集成电路的电源线与地线

通常在电路图中不画出集成运放和数字集成电路的电源引线（包括正电源引线、负电源引线和接地线），因为这不影响分析电路功能，但分析电源电路和实际制作时不能忘记其电源引线与地线，如图 2-10 所示。

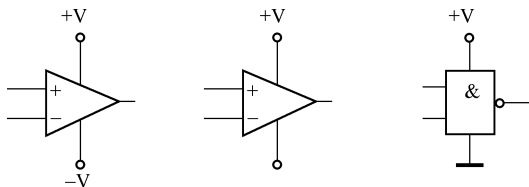


图 2-10 集成电路的电源线与地线



2.3 图形符号的位置与状态

电子电路图中的元器件等图形符号，国家标准中只给出了一个基本图形，但在实际绘图中允许根据需要改变其具体方位和相对位置。

2.3.1 图形符号的方位

元器件图形符号在电路图中的方位可以根据绘图需要放置，既可以横放，也可以竖放；既可以朝上，也可以朝下；还可以旋



转或镜像翻转。例如，NPN 晶体管符号在电路图中就可以有多种方位的画法，如图 2-11 所示。

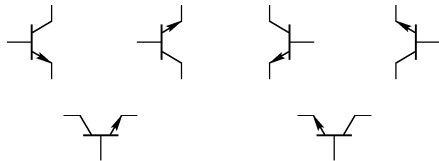


图 2-11 元器件符号可以有多种方位

2.3.2 集中画法与分散画法

有些元器件包括若干组成部分，在电路图中可以根据需要采用集中画法或分散画法。所谓集中画法，是指将该元器件的若干组成部分相对集中地画在一起。所谓分散画法，是指将该元器件的若干组成部分相对分散地画在电路图的不同地方。集中画法或分散画法包括以下两种情况。

(1) 某些元器件具有多个同时动作的部件，如波段开关、多组触点的继电器等。以多组联动的波段开关为例，既可以把各组开关集中画在一起，并用虚线相连表示联动，如图 2-12 (a) 所示，也可以把各组开关分别画在它们所控制的电路附近，而用文字符号“ S_{1-1} ”、“ S_{1-2} ”、“ S_{1-3} ”表示它们是同属 S_1 的多组联动开关，如图 2-12 (b) 所示。

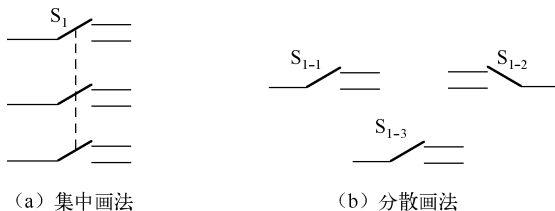


图 2-12 波段开关的集中画法与分散画法

(2) 某些元器件包含若干个独立单元，这种情况以集成电路为多，如双功放、四运放、六反相等。以双功放集成电路为例，图 2-13 (a) 为集中画法，图 2-13 (b) 为分散画法。

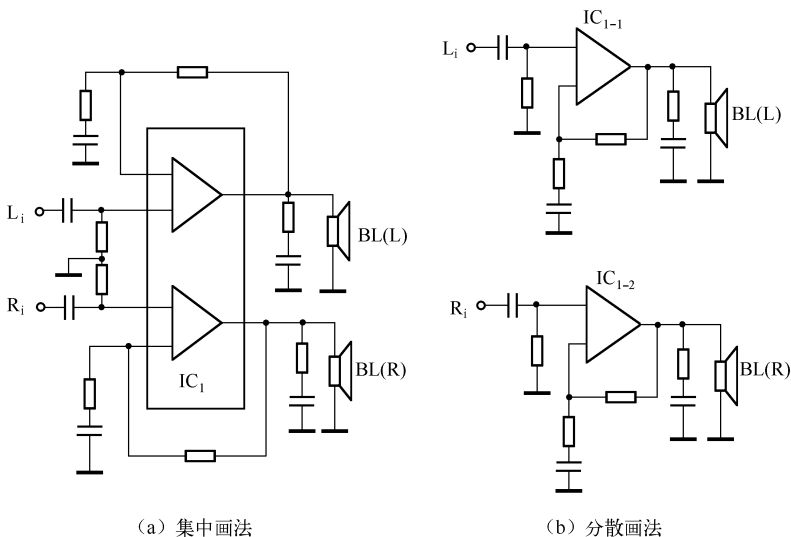


图 2-13 集成功放的集中画法与分散画法

一般来讲，较简单的电路图多采用集中画法，较复杂的电路图通常采用分散画法。

2.3.3 操作性器件的状态

开关、继电器等具有可动部分的操作性器件，在电路图中的图形符号所表示的均为不工作的状态。例如，开关在电路图中处于断开状态，如图 2-14 所示；继电器在电路图中处于未吸合的静止状态，常开触点处于断开位置，常闭触点处于闭合位置，如图 2-15 所示。



图 2-14 开关处于断开状态

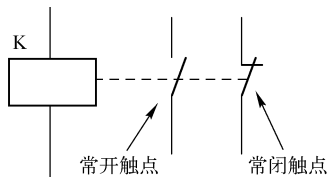




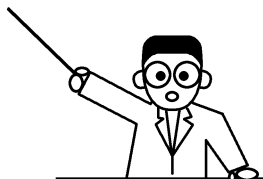


图 2-15 继电器处于未吸合状态

第 3 章

基本元件的符号及其 在电路图中的作用

-  3.1 电阻器与电位器的符号和作用
-  3.2 电容器的符号和作用
-  3.3 电感器的符号和作用
-  3.4 变压器的符号和作用



看图识电子电路图



电阻器、电位器、电容器、电感器和变压器是电子电路中最基本的元件。它们和其他元器件一起构成了电子电路的有机整体。了解并掌握包括基本元件在内的各种元器件的符号、特性和基本作用,是看懂电路图、正确分析电路工作原理的前提。



3.1 电阻器与电位器的符号和作用

电阻器是限制电流的元件,通常简称为电阻,是一种最基本、最常用的电子元件,如图3-1所示。电阻器包括固定电阻器、可变电阻器、敏感电阻器等。

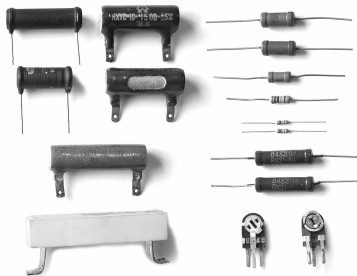


图3-1 电阻器

电位器是调节分压比的元件,是从可变电阻器发展派生出来的,是一种最常用的可调电子元件,如图3-2所示。



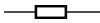


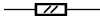
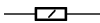
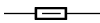
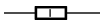
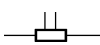


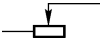



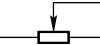
图3-2 电位器



3.1.1 电阻器与电位器的符号

电阻器和电位器的图形符号和文字符号见表 3-1。

表 3-1 电阻器和电位器的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文字符号	说 明
电阻器		R	一般符号
电阻器		R	一般用于加热电阻
可变（可调）电阻器		R	
0.125W 电阻器		R	
0.25W 电阻器		R	
0.5W 电阻器		R	
1W 电阻器		R	大于 1W 都用数字表示
两个固定抽头的电阻器		R	可增加或减少抽头数目
两个固定抽头的可变电阻器		R	可增加或减少抽头数目
带分流和分压接线头的电阻器		R	
滑线式变阻器		R	带箭头的为滑动接点
碳堆可变电阻器		R	
加热元件		R	
熔断电阻器		R	
滑动触点电位器		RP	带箭头的为动接点



续表

名 称	图 形 符 号	文字符号	说 明
带开关的滑动触点电位器		RP	带箭头的为动接点
微调电位器		RP	带箭头的为动接点
压敏电阻器		RV	图形符号中 U 可用 V 代替
热敏电阻器		RT	图形符号中 θ 可用 t° 代替
磁敏电阻器		R	
光敏电阻器		R	

3.1.2 电阻器的作用

电阻器的主要作用是限流和降压。不管是直流电还是交流电，任何电流通过电阻器都要受到一定的阻碍和限制，并且该电流必然在电阻器上产生电压降，如图 3-3 所示。

(1) 电阻器在电路中可限制电流的通过，电阻值越大，电流越小。例如，在如图 3-4 所示发光二极管电路中， R 为限流电阻。从欧姆定律 $I = U/R$ 可知，当电压 U 一定时，流过电阻器的电流 I 与其阻值 R 成反比。由于发光二极管 VD 与限流电阻 R 相串联，通过 R 的电流也就是通过 VD 的电流。选择适当的限流电阻 R ，就可将发光二极管 VD 的工作电流控制在规定范围（图 3-4 中为 10mA），以

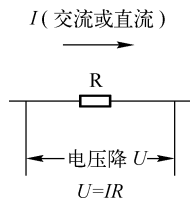


图 3-3 电流产生电压降



确保发光二极管 VD 正常工作。

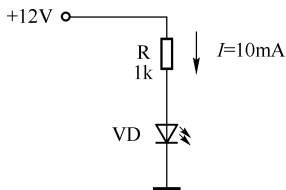


图 3-4 电阻器的限流作用

(2) 通过电阻器的电流会在其上产生电压降，电阻值越大，电压降越大。利用电阻器 R 的降压作用，可以使较高的电源电压适应元器件工作电压的要求。例如，在如图 3-5 所示继电器电路中，R 为降压电阻。电压降 U 的大小与电阻值 R 与电流 I 的乘积成正比，即 $U = IR$ 。继电器工作电压为 6V、工作电流为 60mA，而电源电压为 12V，因此必须串接一个 100Ω 的降压电阻 R 后（降压 6V），方可正常工作。

(3) 电阻器还可以用作分压器。例如，图 3-6 为由电阻器 R_1 和 R_2 构成的分压器，由于两个电阻串联，故通过这两个电阻的电流 I 相等，而电阻上的压降 $U = IR$ ， R_1 上压降为 $1/3U$ ， R_2 上压降为 $2/3U$ ，实现了分压，分压比为 R_1/R_2 （负载电阻应远大于 R_1 、 R_2 ）。

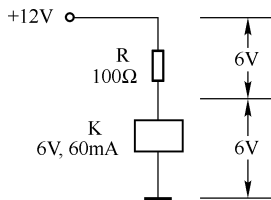


图 3-5 电阻器的降压作用

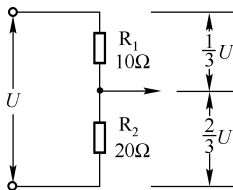


图 3-6 电阻器的分压作用



3.1.3 热敏电阻器的作用

热敏电阻器大多由单晶或多晶半导体材料制成。其符号和外



形如图 3-7 所示。热敏电阻器的特点是其阻值会随温度的变化而变化，正温度系数热敏电阻器的阻值与温度成正比，负温度系数热敏电阻器的阻值与温度成反比，如图 3-8 所示。

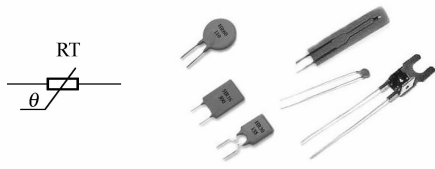


图 3-7 热敏电阻器

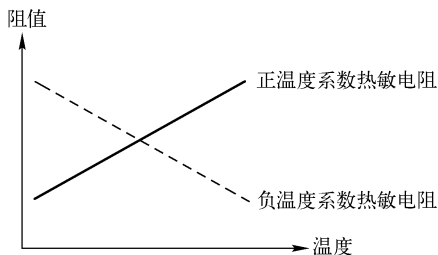


图 3-8 热敏电阻温度 - 阻值曲线

热敏电阻器的作用是进行温度检测，常用于自动控制、自动测温、电气设备的软启动电路等，目前用得较多的是负温度系数热敏电阻器。例如，图 3-9 为电子温度计电路， R_T 为负温度系数热敏电阻器，温度越高， R_T 的阻值越小，其负载电阻 R 上的电压降（A 点电位）就越高。环境温度通过热敏电阻器 R_T 转换为电压，经放大、整流后指示出来。

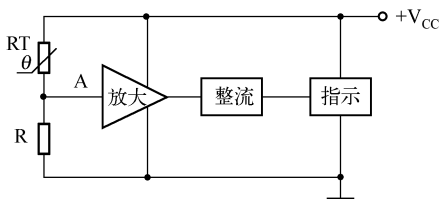


图 3-9 热敏电阻器的应用



3.1.4 光敏电阻器的作用

光敏电阻器是利用半导体的光导电特性原理工作的。其符号和外形如图 3-10 所示。光敏电阻器的特点是其阻值会随入射光线的强弱而变化，入射光线越强，阻值越小，入射光线越弱，阻值越大，如图 3-11 所示。根据光敏电阻器的光谱特性，可分为红外光光敏电阻器、可见光光敏电阻器、紫外光光敏电阻器等种类。

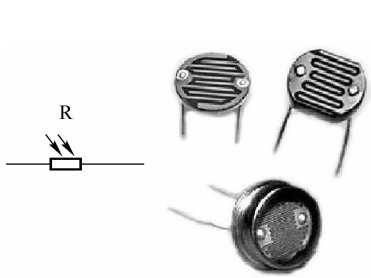


图 3-10 光敏电阻器的符号和外形

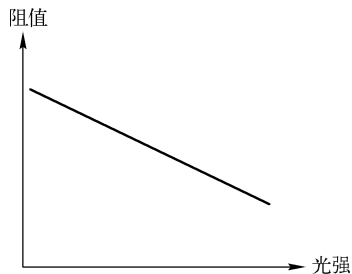


图 3-11 光敏电阻器特性曲线

光敏电阻器的作用是进行光的检测，广泛应用于自动检测、光电控制、通信、报警等电路中。例如，图 3-12 为光控电路， R_2 为光敏电阻器。无光照时，光敏电阻器 R_2 阻值较大，A 点电位较低，控制电路不动作；当有光照时，光敏电阻器 R_2 阻值变小，A 点电位上升，使控制电路动作。

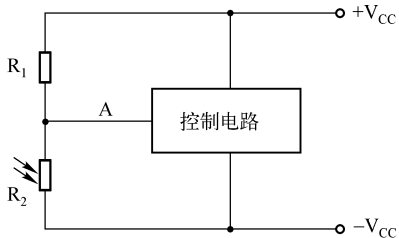


图 3-12 光控电路中光敏电阻器的应用



3.1.5 压敏电阻器的作用

压敏电阻器是利用半导体材料的非线性特性原理制成的。其符号和外形如图 3-13 所示。压敏电阻器的特点是当外加电压达到临界值时,阻值会急剧变小,如图 3-14 所示。

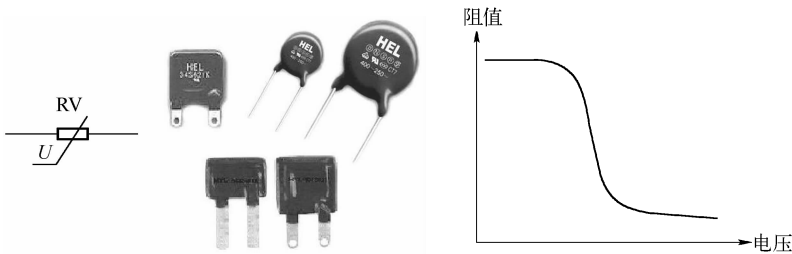


图 3-13 压敏电阻器的符号和外形 图 3-14 压敏电阻电压-阻值曲线

压敏电阻器的作用是用于过压保护和抑制浪涌电流。例如,图 3-15 为电源电路的输入部分,压敏电阻器 RV 跨接于电源变压器 T 的初级两端,在正常情况下,由于 RV 的阻值很大,对电路无影响。当电源输入端一旦出现超过 RV 临界值的过高电压时, RV 阻值急剧减小,电流骤增使保险丝 FU 熔断,保护电源电路不被损坏。

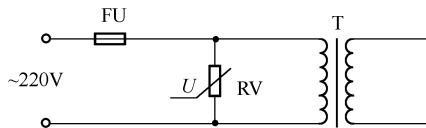


图 3-15 压敏电阻器的应用

3.1.6 电位器的作用

电位器的特点是可以连续改变电阻比。电位器的结构如图 3-16 所示,电阻体的两端各有一个定臂引出端,中间是动臂引出端。动臂将电阻体分成上、下两部分,当动臂在电阻体上移



动时，即可使上、下两部分电阻体的电阻比值连续变化。

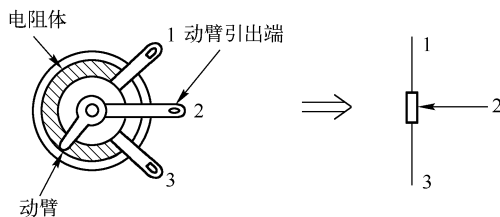


图 3-16 电位器的结构

电位器接入电路可起到可变分压的作用。如图 3-17 所示， R_P 为电位器，设电阻体的上、下部分分别为 R_a 和 R_b 。当动臂 2 端处于电阻体中间时， $R_a = R_b$ ，如图 3-17 (a) 所示，动臂 2 处输出电压为输入电压的一半。

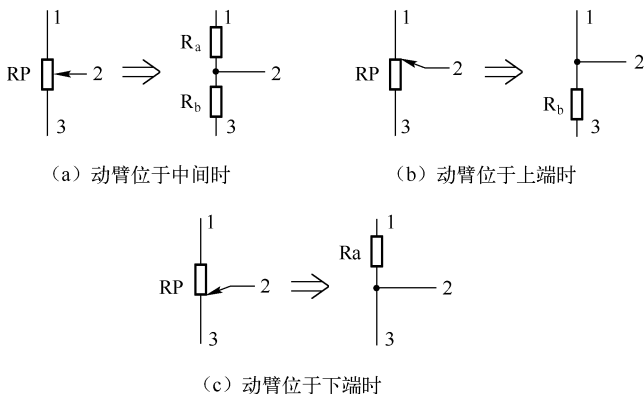


图 3-17 电位器的分压作用

当动臂 2 端向上移动时， R_a 减小而 R_b 增大。当动臂 2 端移至最上端时， $R_a = 0$ ， $R_b = R_P$ ，如图 3-17 (b) 所示，动臂 2 端输出电压为输入电压的全部。

当动臂 2 端向下移动时， R_a 增大而 R_b 减小。当动臂 2 端移至最下端时， $R_b = 0$ ， $R_a = R_P$ ，如图 3-17 (c) 所示，动臂 2 端



输出电压为“0”。

收音机中的音量调节电位器就是可变分压的一个例子。如图 3-18 所示, 前级信号电压全部加在电位器 RP 的两端, 从动臂 2 端获得一定分压比的信号送往功放级。转动电位器动臂改变分压比, 即改变了送往功放级的信号大小, 达到调节音量的目的。

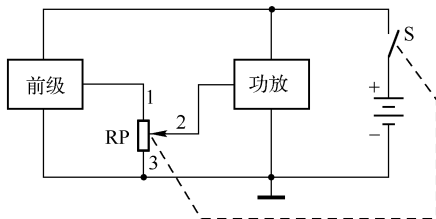


图 3-18 电位器控制音量



3.2 电容器的符号和作用

电容器是储存电荷的元件, 通常简称为电容, 是最基本、最常用的电子元件之一。电容器包括固定电容器和可变电容器两大类。固定电容器又分为无极性电容器和有极性电容器, 如图 3-19 所示。

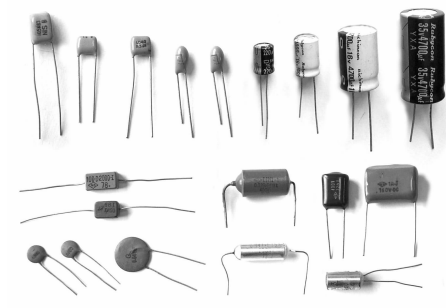


图 3-19 电容器

可变电容器是容量可以在一定范围内连续调节的电容器, 是一种常用的可调电子元件, 如图 3-20 所示。

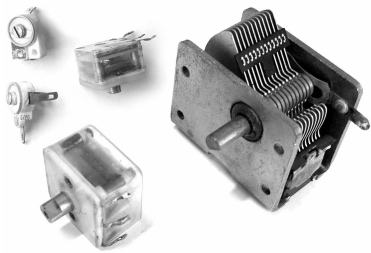


图 3-20 可变电容器



3.2.1 电容器的符号

电容器的图形符号和文字符号见表 3-2。

表 3-2 电容器的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
电容器		C	一般符号
穿心电容器		C	
极性电容器		C	示出正极
可变（可调）电容器		C	
双联同轴可变电容器		C	可增加同调联数
微调电容器		C	



续表

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
差动可调电容器		C	
分裂定片可变电容器		C	
热敏极性电容器		C	图形符号中 θ 可用 t° 代替
压敏极性电容器		C	图形符号中 U 可用 V 代替

3.2.2 电容器的作用

电容器的特点是隔直流、通交流。因为电容器两电极间是绝缘的，直流电不能通过电容器，而交流电则可以充、放电的方式“通过”电容器。电容器对交流电具有一定的阻力，称之为容抗 X_C 。容抗 X_C 分别与交流电的频率 f 和电容器的容量 C 成反比，即 $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$ ，如图 3-21 所示。交流电的频率越高，容抗越小，电容器的容量越大，容抗越小。

电容器的主要作用是耦合、旁路、移相和谐振。

(1) 信号耦合。电容器可以将前级电路的交流信号耦合至

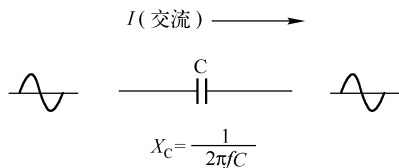


图 3-21 容抗的意义

后级电路。图 3-22 为两级音频放大电路，晶体管 VT_1 集电极输出的交流信号通过电容 C 传输到 VT_2 基极，而 VT_1 集电极的直流电位则不会影响到 VT_2 基极， VT_1 与 VT_2 可以有各自适当的直流工作点，这就是电容器的耦合作用。

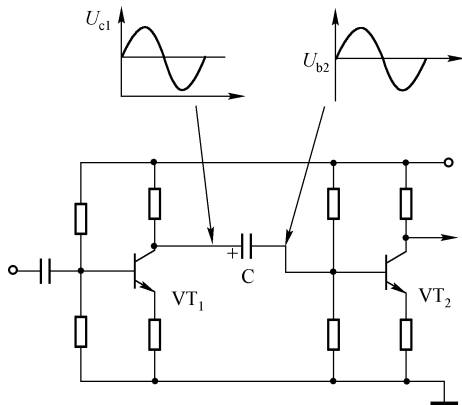


图 3-22 电容器的耦合作用

(2) 旁路滤波。电容器可以将电压中的交流成分滤除。图 3-23 为整流电源电路，二极管整流出来的电压 U_i 是脉动直流，其中既有直流成分也有交流成分，由于输出端接有滤波电容器 C ，交流成分被 C 旁路到地，输出电压 U_o 就是较纯净的直流电压了。

(3) 移相。由于通过电容器的电流大小取决于交流电压的变化率，因此电容器上电流超前电压 90° ，具有移相作用，如图 3-24 所示。

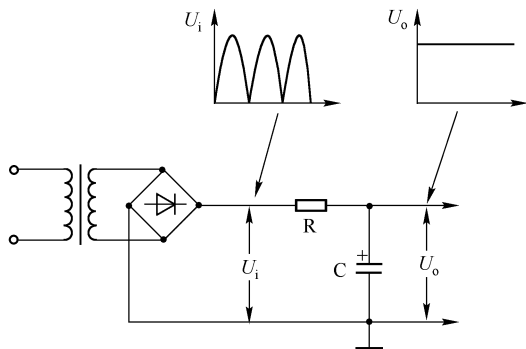


图 3-23 电容器的旁路滤波作用

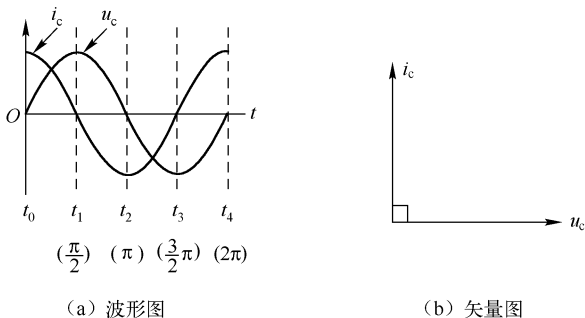


图 3-24 电容器的移相作用

利用电容器上电流超前电压特性构成的 RC 移相网络如图 3-25 所示。电路输出电压 U_o 取自电阻 R，由于电容器 C 上电流 i 超前输入电压 U_i ，因此 U_o 超前 U_i 一个相移角 φ ， φ 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间，由 R、C 的比值决定。

当需要的相移角超过 90° 时，可用多节移相网络来实现。图 3-26 为三节 RC 移相网络，每节移相 60° ，三节共移相 180° 。

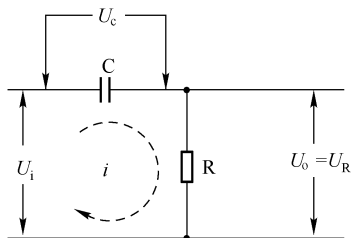


图 3-25 RC 移相网络

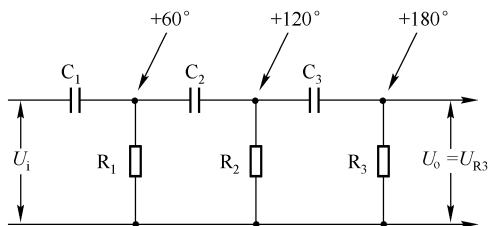


图 3-26 三节 RC 移相网络

(4) 谐振。电容器可以与电感器组成 LC 谐振回路，例如，在如图 3-27 所示超外差收音机中放电路中，电容器 C 与中频变压器 T 的初级线圈 L_1 组成并联谐振回路，谐振于 465kHz 中频频率上，使中频信号得到放大。

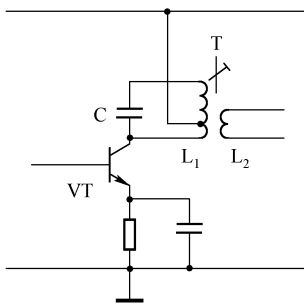


图 3-27 LC 谐振回路



3.2.3 可变电容器的作用

可变电容器的作用是改变和调节回路的谐振频率。例如，在如图 3-28 所示中，谐振频率 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ， f 与电容量 C 的平方根成反比，改变可变电容器 C 的数值即可改变电路的谐振频率。

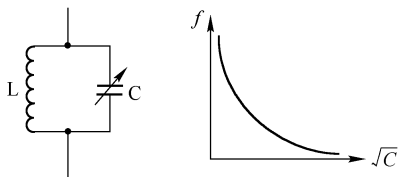


图 3-28 谐振频率与电容量的关系

可变电容器常用于收音机的调谐回路，起到选择电台的作用。图 3-29 为超外差收音机变频级电路，双联可变电容器 C_1 中的一连 C_{1a} 接入天线输入回路，另一连 C_{1b} 接入本机振荡回路，调节 C_1 两连容量同步改变即可改变接收频率。

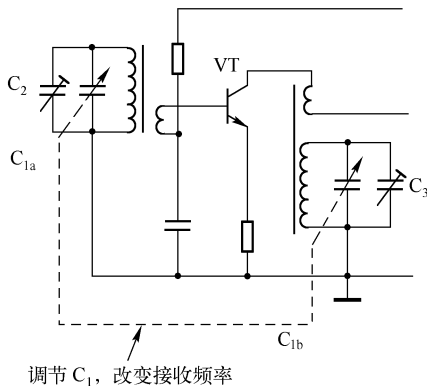


图 3-29 超外差收音机变频级电路



3.3 电感器的符号和作用

电感器是储存电能的元件，通常简称为电感，也是常用的基本电子元件之一，如图 3-30 所示。电感器可分为固定电感器和可调电感器及空心电感器、磁心电感器和铁心电感器等。扼流圈、偏转线圈、振荡线圈等也是一种电感器。



图 3-30 电感器



3.3.1 电感器的符号

电感器的图形符号和文字符号见表 3-3。

表 3-3 电感器的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
电感器、线圈、绕组、扼流圈		L	
带磁心铁心的电感器		L	



续表

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
磁心有间隙的电感器		L	
带磁心连续可调的电感器		L	
有两个抽头的电感器		L	可增加或减少抽头数目
有两个抽头的电感器		L	可增加或减少抽头数目
可变电感器		L	
穿在导线上的磁珠		L	

3.3.2 电感器的作用

电感器的特点是通直流、阻交流。直流电可以无阻碍地通过电感器，而交流电通过电感器时则会受到很大的阻力。电感器对交流电所呈现的阻力称为感抗 X_L 。感抗 X_L 分别与交流电的频率 f 和电感器的电感量 L 成正比，即 $X_L = 2\pi fL$ ，如图 3-31 所示。交流电的频率越高，感抗越大，电感器的电感量越大，感抗越大。

$$X_L = 2\pi fL$$

图 3-31 感抗的意义

电感器的主要作用是分频、滤波和谐振。

(1) 分频。电感器可以用于区分高、低频信号。例如，在如图 3-32 所示来复式收音机电路中，电感器 L 起到高频阻流圈的作用。由于电感器 L 对高频电流感抗很大而对音频电流感抗很小，因此晶体管 VT 集电极输出的高频信号只能通过电容 C 进入检波电路。检波得到的音频信号再经过晶体管 VT 放大后，则可以通过电感器 L 到达耳机。

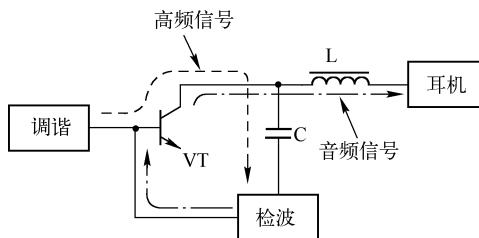


图 3-32 电感器的分频作用

(2) 滤波。电感器能够阻止电压中的交流成分通过。例如，在如图 3-33 所示整流电源电路中，电感器 L 与电容器 C_1 、 C_2 组成 π 形 LC 滤波器。由于电感器 L 具有通直流、阻交流的功能，因此整流二极管输出的脉动直流电压 U_i 中的直流成分可以通过电感器 L ，而交流成分绝大部分不能通过 L ，而被 C_1 、 C_2 旁路到地，输出电压 U_o 便是较纯净的直流电压了。

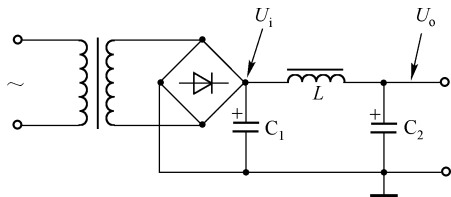


图 3-33 电感器的滤波作用

(3) 谐振。电感器可以与电容器组成 LC 谐振选频回路。例如，在如图 3-34 所示收音机高放级电路中，可变电感器 L 与电容器 C_1 组成调谐回路，调节电感器 L 的值即可改变谐振频率，起到选台的作用。

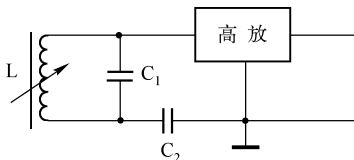


图 3-34 电感器的选台作用



3.4 变压器的符号和作用

变压器是变换电压的元器件，包括电源变压器、音频变压器、中频变压器、高频变压器、脉冲变压器等，是一种常用元器件，如图 3-35 所示。

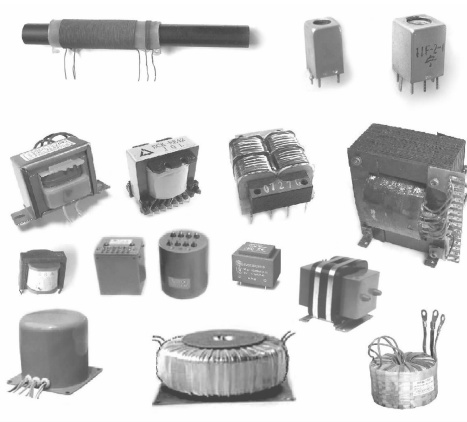


图 3-35 变压器

变压器的特点是传输交流、隔离直流。变压器各绕组线圈之间互不相通，但交流电可以通过磁场耦合进行传输，并可同时实现电压变换、阻抗变换和相位变换，如图 3-36 所示。

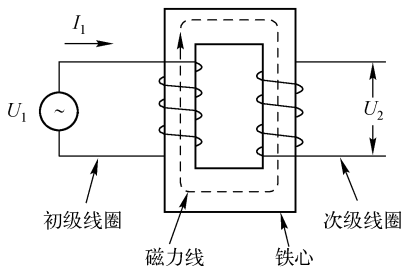


图 3-36 变压器的结构与工作原理



3.4.1 变压器的符号

变压器的图形符号和文字符号见表 3-4。

表 3-4 变压器的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
双绕组变压器		T	
带铁心双绕组变压器		T	
示出瞬时电压极性的带铁心变压器		T	
带铁心三绕组变压器		T	绕组数可增加
电流互感器，脉冲变压器		TA	
绕组间有屏蔽的双绕组变压器		T	
绕组间有屏蔽的双绕组铁心变压器		T	
有中间抽头的变压器		T	抽头数可增加
耦合可变的变压器		T	



续表

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
自耦变压器		T	
可调压的自耦变压器		T	

3.4.2 电源变压器的作用

电源变压器是最常用的一类变压器。其主要作用是电源电压变换。电源变压器可分为降压变压器 ($U_2 < U_1$)、升压变压器 ($U_2 > U_1$)、隔离变压器 ($U_2 = U_1$)、多绕组变压器等, 如图 3-37 所示。

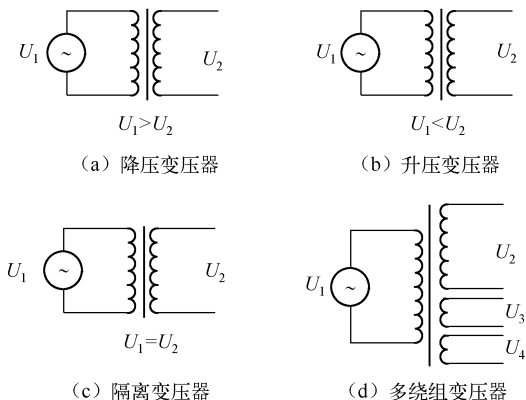


图 3-37 电源变压器的种类

电源变压器的电压变换比取决于次级与初级的圈数比。如图 3-38 所示, 变压器空载时, 次级电压 U_2 与初级电压 U_1 之比, 等于次级圈数 N_2 与初级圈数 N_1 之比。接入负载时, 由于变压器效率等原因, 次级电压要略低些。

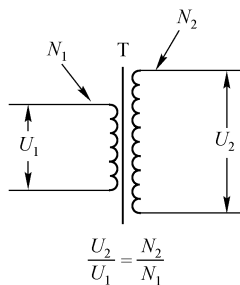


图 3-38 电压比等于圈数比

(1) 电源变压器的用途是电源电压变换，并可同时提供多种电源电压，以适应电路对电源的多种需要，如图 3-39 所示。

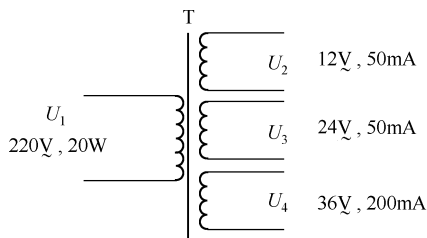


图 3-39 变压器可提供多种电压

(2) 电源变压器的另一用途是电源隔离。如图 3-40 所示，由于电源变压器隔断了电器与 220V 市电的直接连接，即使人体万一触碰到电压 U_2 ，也不会与交流 220V 市电构成回路，保证了人身安全。

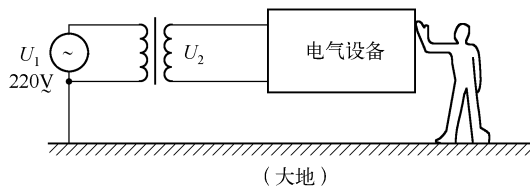


图 3-40 电源变压器的隔离作用



3.4.3 音频变压器的作用

音频变压器是工作于音频范围的变压器，主要作用是阻抗变换与匹配、信号传输与分配。变压器的阻抗变换作用如图 3-41 所示。变压器初级与次级的圈数比不同，耦合过来的阻抗也不同。在数值上，次级阻抗 R_2 与初级阻抗 R_1 之比，等于次级圈数 N_2 与初级圈数 N_1 之比的平方。

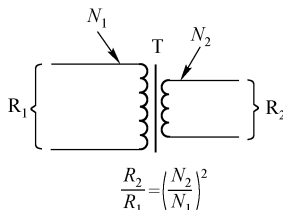


图 3-41 变压器的阻抗变换作用

变压器的相位变换作用如图 3-42 所示。图中标出了各绕组线圈的瞬时电压极性。通过改变变压器线圈的接法，可以很方便地将信号电压倒相。

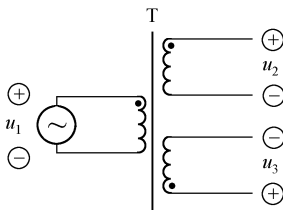


图 3-42 变压器的相位变换作用

下面我们通过如图 3-43 所示推挽功率放大器电路，对音频变压器的作用做进一步的说明。推挽功率放大器中的输入变压器和输出变压器都属于音频变压器。

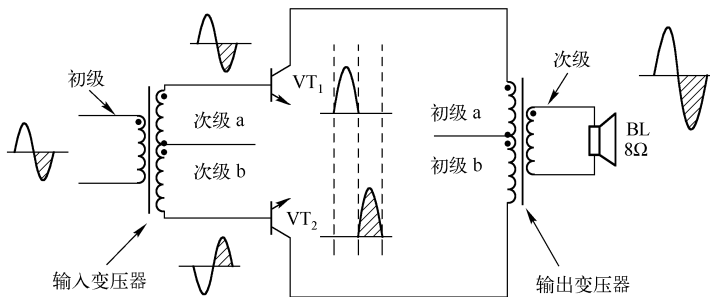


图 3-43 推挽功率放大器电路

(1) 音频变压器具有信号传输、倒相与分配的作用。在如图 3-43 所示推挽功率放大器电路中，输入变压器将信号电压传输、分配给晶体管 VT_1 和 VT_2 （送给 VT_2 的信号还倒了相），使 VT_1 和 VT_2 轮流分别放大正、负半周信号，然后再由输出变压器将信号合成输出。

(2) 音频变压器具有阻抗变换和匹配的作用。输出变压器将扬声器的 8Ω 低阻变换为数百欧姆的高阻，与放大器的输出阻抗相匹配，使得放大器输出的音频功率最大而失真最小。

▶▶ 3.4.4 中频变压器的作用

中频变压器习惯上简称为中周，应用于超外差收音机和电视机的中频放大电路中。中频变压器分为单调谐式和双调谐式两种，如图 3-44 所示。单调谐式中频变压器的初级和次级绕在一个磁心上，依靠磁场进行耦合。双调谐式中频变压器的初级和次级绕分为两个独立的线圈，依靠电容或电感进行耦合。

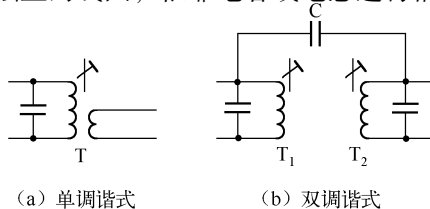


图 3-44 中频变压器



(1) 中频变压器具有选频作用。在如图 3-45 所示超外差收音机中放电路中，中频变压器 T_1 、 T_2 的初级线圈分别与 C_1 、 C_2 组成 465kHz 谐振回路作为晶体管 VT_1 、 VT_2 的负载，因此只有 465kHz 中频信号得到放大，起到了选频的作用。

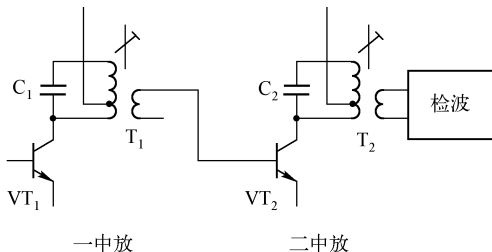


图 3-45 中频变压器的选频与耦合作用

(2) 中频变压器具有耦合作用。在如图 3-45 所示超外差收音机中放电路中，一中放 (VT_1) 的输出信号通过中频变压器 T_1 耦合到二中放 (VT_2)，二中放 (VT_2) 的输出信号通过中频变压器 T_2 耦合到检波级。

3.4.5 高频变压器的作用

高频变压器通常是指工作于射频范围的变压器，收音机的磁性天线就是一个高频变压器，如图 3-46 所示。

(1) 高频变压器具有耦合作用。在如图 3-46 所示收音机天线电路中，磁性天线 W 的初级线圈与可变电容器 C 组成选频回路，选出的电台信号通过磁性天线初级与次级之间的耦合传输到高频或变频级 (VT_1)。

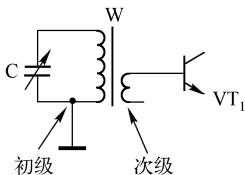


图 3-46 磁性天线

(2) 高频变压器具有阻抗变换作用。电视机天线阻抗变换器是一种高频变压器，如图 3-47 所示，折叠偶极子天线输出的



300 Ω 平衡信号，通过高频变压器 T 变换为 75 Ω 不平衡信号送入电视机。

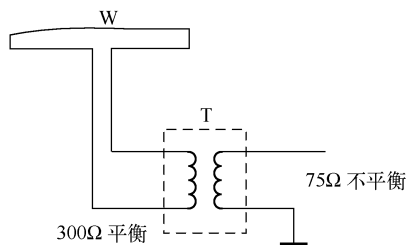






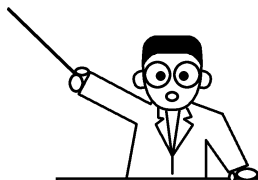


图 3-47 电视阻抗变换器

第 4 章

半导体管的符号及其 在电路图中的作用

-  4.1 晶体二极管的符号和作用
-  4.2 稳压二极管的符号和作用
-  4.3 晶体三极管的符号和作用
-  4.4 场效应管的符号和作用
-  4.5 单结晶体管的符号和作用
-  4.6 晶体闸流管的符号和作用



看图识电子电路图



半导体管是电子电路中最重要元器件。半导体管包括晶体二极管、晶体三极管、场效应管、单结晶体管和晶体闸流管等。它们在放大、振荡等单元电路中起着核心的关键作用。了解半导体管，掌握半导体管的符号、特点和作用，对于看懂电路图是十分重要的。



4.1 晶体二极管的符号和作用

晶体二极管简称二极管，是一种常用的具有一个 PN 结的半导体器件。晶体二极管包括整流二极管、检波二极管、开关二极管、稳压二极管和特种二极管等，如图 4-1 所示。

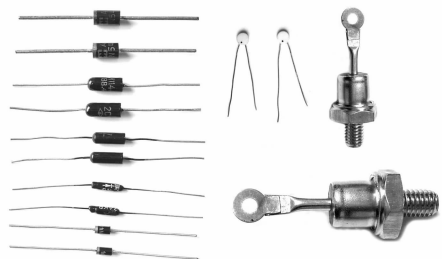


图 4-1 晶体二极管



4.1.1 晶体二极管的符号

晶体二极管的图形符号和文字符号见表 4-1。

表 4-1 晶体二极管的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
晶体二极管		VD	一般符号， 左为正极， 右为负极
温度效应二极管		VD	图形符号中 θ 可用 t° 代替
变容二极管		VD	左为正极， 右为负极



续表

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
隧道二极管		VD	左为正极， 右为负极
反向二极管 (单隧道二极管)		VD	左为正极， 右为负极
双向二极管， 交流开关二极管		VD	
阶跃恢复二极管		VD	左为正极， 右为负极
体效应二极管		VD	
磁敏二极管		VD	左为正极， 右为负极

4.1.2 晶体二极管的作用

晶体二极管的特点是具有单向导电性，在一般情况下只允许电流从正极流向负极，而不允许电流从负极流向正极，如图4-2所示。

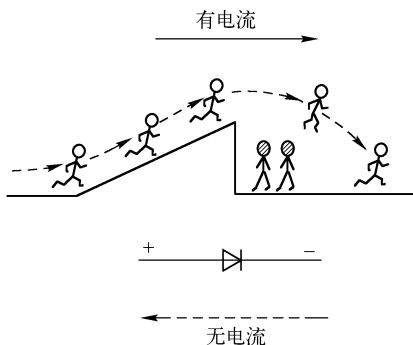


图4-2 晶体二极管的单向导电性

电流通过晶体二极管时，要在PN结上产生管压降 U_{VD} ，如图4-3所示。锗二极管的正向管压降约为0.3V，硅二极管的正向管压降约为0.7V。其伏安特性曲线如图4-4所示。从伏安特



性曲线可知,晶体二极管的电压与电流为非线性关系,所以晶体二极管是非线性半导体器件。

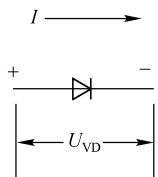


图 4-3 二极管的管压降

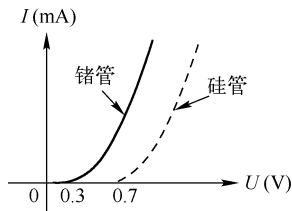


图 4-4 二极管伏安特性曲线

晶体二极管的主要作用是整流、检波和电子开关等。

(1) 整流是晶体二极管的主要作用。图 4-5 为半波整流电源电路。VD 为整流二极管。由于二极管的单向导电特性,在交流电正半周时,二极管 VD 导通,电路有输出电压。在交流电负半周时二极管 VD 截止,电路无输出电压。经二极管 VD 整流出来的脉动电压再经 RC 滤波器滤波后即为直流电压。

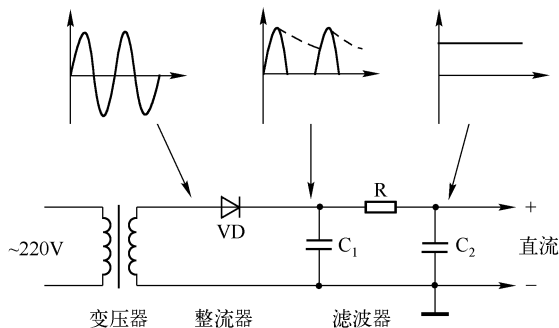


图 4-5 半波整流电源电路

图 4-6 为桥式全波整流电路,使用 4 只晶体二极管。当交流电为正半周时,电流 I_1 经 VD_2 、负载 R 、 VD_4 形成回路,负载上电压 U_R 为上正、下负。当交流电为负半周时,电流 I_2 经 VD_3 、负载 R 、 VD_1 形成回路,负载上电压 U_R 仍为上正、下负,实现全



波整流，整流效率大大提高。

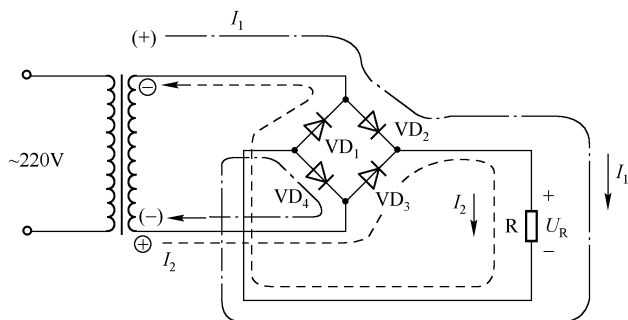


图 4-6 桥式全波整流电路

(2) 检波是晶体二极管的又一主要作用。图 4-7 为超外差收音机检波电路，VD 为检波二极管。第二中放级输出的调幅波加到二极管 VD 负极，其正半周被截止，负半周通过二极管，再由 RC 滤波器滤除其中的高频成分，输出的就是调制在载波上的音频信号，这个过程称为检波。

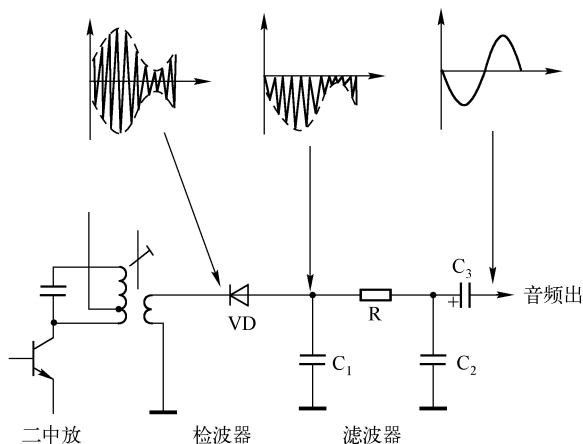


图 4-7 二极管检波电路



(3) 晶体二极管还可以用作电子开关。图 4-8 为开关电路，VD 为开关二极管。当二极管 VD 正极接 +9V 时，VD 导通，输入端 (IN) 信号可以通过二极管 VD 到达输出端 (OUT)。当二极管 VD 正极接 -9V 时，VD 截止，输入端 (IN) 与输出端 (OUT) 之间通路被切断。

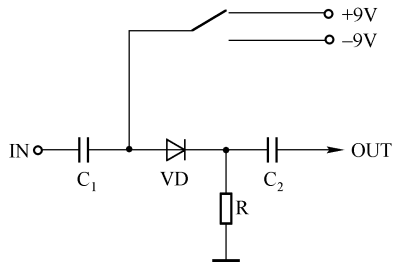


图 4-8 二极管电子开关电路



4.2 稳压二极管的符号和作用

稳压二极管是一种特殊的具有稳压功能的二极管，如图 4-9 所示。

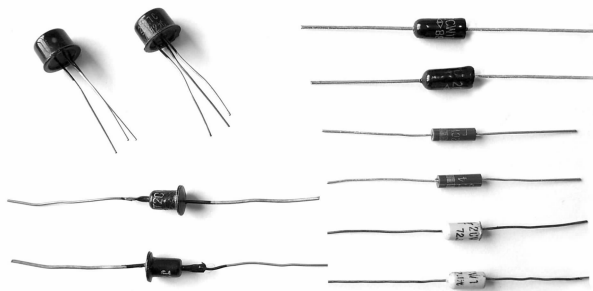


图 4-9 稳压二极管



4.2.1 稳压二极管的符号

稳压二极管的图形符号和文字符号见表4-2。

表4-2 稳压二极管的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
单向击穿二极管 (稳压二极管)		VD	左为正极, 右为负极
双向击穿二极管		VD	

4.2.2 稳压二极管的作用

稳压二极管的特点是工作于反向击穿状态,具有稳定的端电压。与普通二极管不同的是,稳压二极管的工作电流是从负极流向正极,如图4-10所示。

稳压二极管是利用PN结反向击穿后,其端电压在一定范围内保持不变的原理工作的。只要其反向电流不超过最大工作电流,则稳压二极管是不会损坏的。图4-11为稳压二极管的伏安特性曲线。

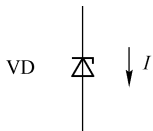


图4-10 稳压二极管的电流方向

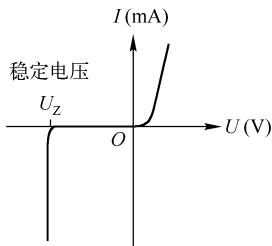


图4-11 稳压二极管伏安特性曲线

稳定电压是稳压二极管的主要作用。

(1) 并联稳压电路如图4-12所示。稳压二极管VD并联在输出端,VD上的电压即为输出电压。这种简单并联稳压电路主要应用在输入电压变化不大、负载电流较小的场合。

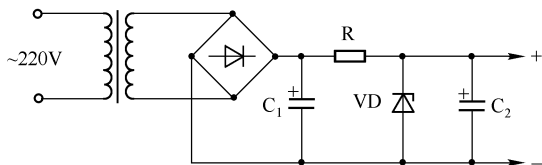


图 4-12 并联稳压电路

(2) 串联稳压电路如图 4-13 所示。串联在输出电路中的调整管 VT 相当于一个可变电阻。由于 VT 的基极电压被稳压二极管 VD 所稳定，所以当输出电压发生变化时，调整管 VT 的基极与发射极之间的电压必然发生相应的变化，迫使调整管 VT 的管压降向相反方向变化，从而使输出电压保持稳定。

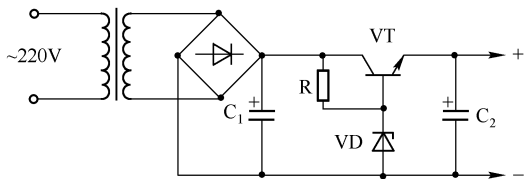


图 4-13 串联稳压电路

(3) 瞬态电压抑制二极管是一种特殊的稳压二极管，在遇到高能量瞬态浪涌电压时，能够迅速反向击穿，将浪涌电流分流，并将其电压钳位于规定值。

瞬态电压抑制二极管的特点是能够吸收浪涌高压。其作用是过压保护。单极型瞬态电压抑制二极管一般用于直流电路负载保护，如图 4-14 所示。VD 为单极型瞬态电压抑制二极管，R 是限流电阻。双极型瞬态电压抑制二极管具有双向过压保护功能，可用于包括交流电路在内的各电路不同部位的保护，如图 4-15 所示。VD₁、VD₂ 为双极型瞬态电压抑制二极管。

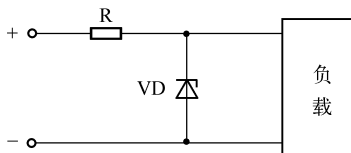


图 4-14 单向过压保护电路

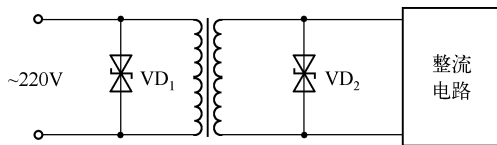


图 4-15 双向过压保护电路



4.3 晶体三极管的符号和作用

晶体三极管通常简称为晶体管或三极管，是一种具有两个 PN 结的半导体器件，如图 4-16 所示。晶体三极管是电子电路中的核心元器件之一，在各种电子电路中的应用十分广泛。

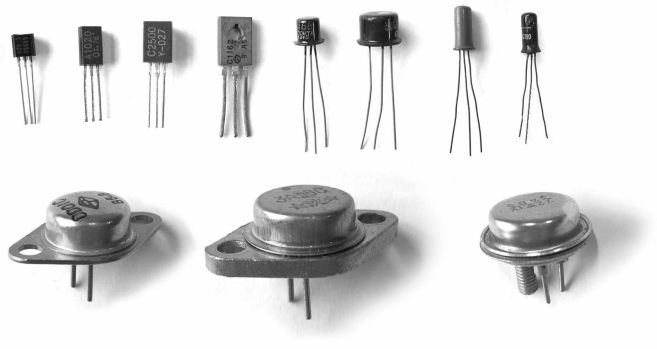


图 4-16 晶体三极管

晶体三极管分为 NPN 型和 PNP 型两大类。它们的导电极性完全不同。NPN 型晶体管工作时，电流由集电极 c 和基极 b 流向发射极 e；PNP 型管工作时，电流由发射极 e 流向集电极 c 和基极 b，如图 4-17 所示。

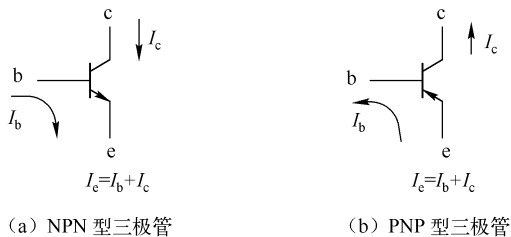


图 4-17 晶体三极管的极性

4.3.1 晶体三极管的符号

晶体三极管的图形符号和文字符号见表 4-3。

表 4-3 晶体三极管的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
PNP 型晶体三极管		VT	左为基极 b, 上为集电极 c, 下为发射极 e
NPN 型晶体三极管		VT	左为基极 b, 上为集电极 c, 下为发射极 e
NPN 型晶体三极管, 集电极接管壳		VT	左为基极 b, 上为集电极 c, 下为发射极 e
NPN 型雪崩三极管		VT	左为基极 b, 上为集电极 c, 下为发射极 e
NPN 型磁敏三极管		VT	左为基极 b, 上为集电极 c, 下为发射极 e

4.3.2 晶体三极管的作用

晶体三极管的特点是具有电流放大作用，即可以用较小的基极电流控制较大的集电极（或发射极）电流，集电极电流是基



极电流的 β 倍。

晶体三极管的基本工作原理如图 4-18 所示（以 NPN 型管为例）。当给基极（输入端）输入一个较小的基极电流 I_b 时，其集电极（输出端）将按比例产生一个较大的集电极电流 I_c 。这个比例就是三极管的电流放大系数 β ，即 $I_c = \beta I_b$ 。发射极是公共端，发射极电流 $I_e = I_b + I_c = (1 + \beta) I_b$ 。可见，集电极电流和发射极电流受基极电流的控制，所以晶体三极管是电流控制型器件。

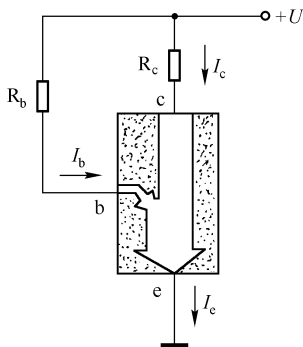


图 4-18 晶体三极管的基本工作原理

晶体三极管的主要作用是放大、振荡、开关、可变电阻和阻抗变换等。

(1) 放大是晶体三极管最主要的作用。图 4-19 为晶体三极管放大电路，输入信号 U_i 经耦合电容 C_1 加至晶体三极管 VT 基极使基极电流 I_b 随之变化，进而使集电极电流 I_c 相应变化，变化量为基极电流的 β 倍，并在集电极负载电阻 R_c 上产生较大的压降，经耦合电容 C_2 隔离直流后输出，在输出端便得到放大的信号电压 U_o 。由于输出电压等于电源电压 $+V_{CC}$ 与 R_c 上压降的差值，因此输出电压 U_o 与输入电压 U_i 相位相反。

(2) 晶体三极管可以构成振荡电路。图 4-20 为电子门铃电路，晶体三极管 VT 与变压器 T 等组成变压器反馈音频振荡器。



由于变压器 T 初、次级之间的倒相作用，VT 集电极的音频信号经 T 耦合后正反馈至其基极，形成振荡。

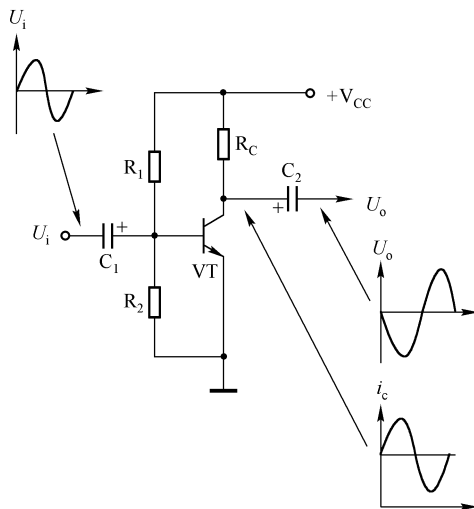


图 4-19 晶体三极管放大电路

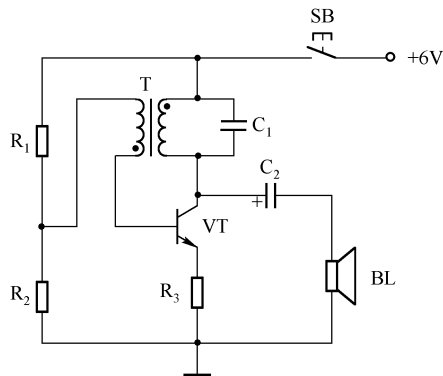


图 4-20 晶体三极管振荡电路

(3) 晶体三极管可以用作电子开关。图 4-21 为驱动发光二极管的电子开关电路，晶体三极管 VT 即为电子开关。VT 的基



极由脉冲信号 CP 控制，当 $CP = 1$ 时，VT 导通，使发光二极管 VD 发光。当 $CP = 0$ 时，VT 截止，使发光二极管 VD 熄灭。

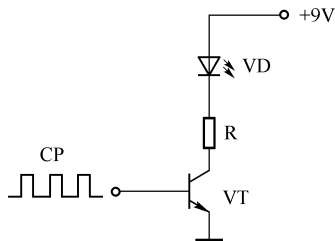


图 4-21 晶体三极管开关电路

(4) 晶体三极管可以用作可变电阻。图 4-22 为录音机录音电平自动控制电路（ALC 电路），晶体三极管 VT 在这里作为可变电阻。话筒输出的音频信号经 R_2 、VT 集电极与发射极之间的等效电阻分压后，送往放大器进行放大。由于 VT 集电极与发射极之间的等效电阻随基极电流的变化而变化，而基极电流由放大器输出信号经整流获得的控制电平控制，使分压比随输出信号做反向变化，从而实现录音电平的自动控制。

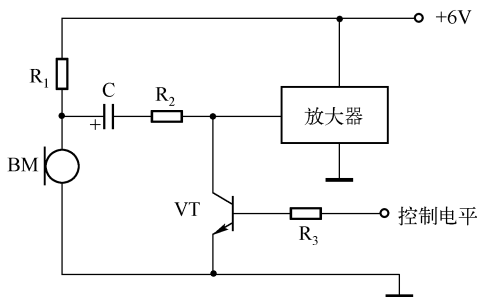


图 4-22 晶体三极管用作可变电阻

(5) 晶体三极管还具有阻抗变换的作用。图 4-23 为射极跟随器电路，由于电路输出信号自晶体三极管 VT 的发射极取出，输出电压全部负反馈到输入端，所以射极跟随器具有很高的输入



阻抗 Z_i 和很低的输出阻抗 Z_o ，常用作阻抗变换和缓冲电路。

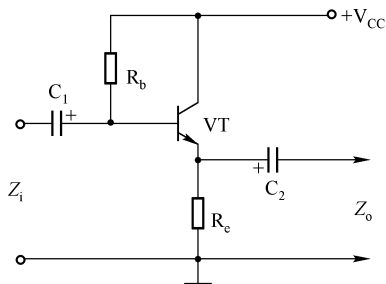


图 4-23 射极跟随器电路



4.4 场效应管的符号和作用

场效应晶体管通常简称为场效应管，是一种利用场效应原理工作的半导体器件，如图 4-24 所示。

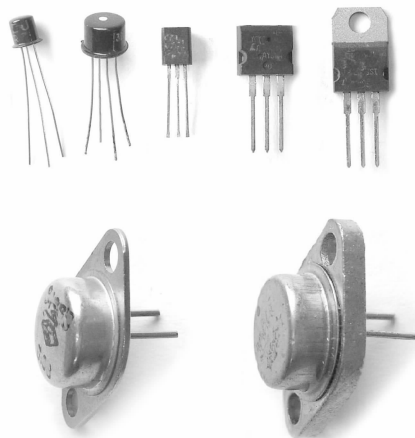


图 4-24 场效应管



场效应管分为结型场效应管和绝缘栅场效应管（MOS 管）两大类。两大类又都有 N 沟道和 P 沟道之分。结型和耗尽型 MOS 管正常工作时，N 沟道管应加负栅压，P 沟道管应加正栅压，如图 4-25 所示。

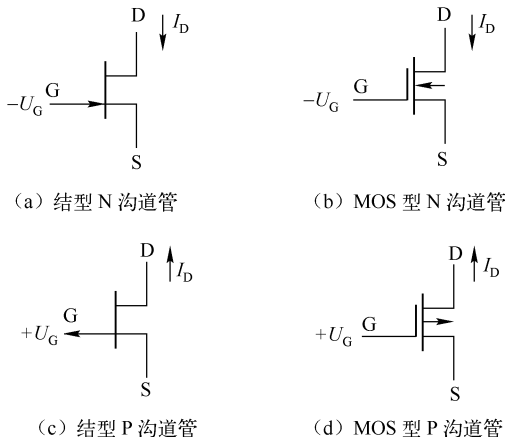


图 4-25 场效应管的类型

4.4.1 场效应管的符号

场效应管的图形符号和文字符号见表 4-4。

表 4-4 场效应管的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
N 沟道结型场效应管		VT	左为栅极 G，与源极 S 在同一直线上，上为漏极 D
P 沟道结型场效应管		VT	左为栅极 G，与源极 S 在同一直线上，上为漏极 D
增强型、单栅、P 沟道和衬底无引出线的绝缘栅场效应管		VT	左为栅极 G，上为漏极 D，下为源极 S



续表

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
增强型、单栅、N 沟道 和衬底无引出线的 绝缘栅场效应管		VT	左为栅极 G, 上为漏极 D, 下为源极 S
增强型、单栅、P 沟道 和衬底有引出线的 绝缘栅场效应管		VT	左为栅极 G, 上为漏极 D, 下为源极 S
增强型、单栅、N 沟道 和衬底与源极在内部 连接的绝缘场效应管		VT	左为栅极 G, 上为漏极 D, 下为源极 S
耗尽型、单栅、N 沟道 和衬底无引出线的 绝缘栅场效应管		VT	左为栅极 G, 上为漏极 D, 下为源极 S
耗尽型、单栅、P 沟道 和衬底无引出线的 绝缘栅场效应管		VT	左为栅极 G, 上为漏极 D, 下为源极 S
耗尽型、双栅、N 沟道 和衬底有引出线的 绝缘栅场效应管		VT	左为第二栅极 G2, 左下为第一栅极 G1, 右上为漏极 D, 右下 为源极 S
N 沟道结型场效应对管		VT	

4.4.2 场效应管的作用

场效应管的特点是由栅极电压 U_G 控制其漏极电流 I_D 。与普通双极型晶体管相比较,场效应管具有输入阻抗高、噪声低、动态范围大、功耗小、易于集成等特点。

场效应管的基本工作原理如图 4-26 所示(以结型 N 沟道管为例)。由于栅极 G 接有负偏压 ($-U_G$),在 G 附近形成耗尽层。当负偏压 ($-U_G$) 的绝对值增大时,耗尽层增大,沟道减小,漏极电流 I_D 减小。当负偏压 ($-U_G$) 的绝对值减小时,耗尽层减小,沟道增大,漏极电流 I_D 增大。可见,漏极电流 I_D 受



栅极电压的控制，所以场效应管是电压控制型器件，即通过输入电压的变化来控制输出电流的变化。

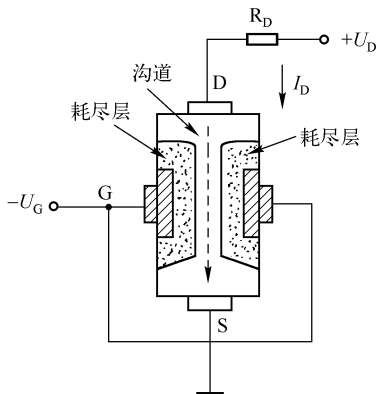


图 4-26 场效应管的基本工作原理

场效应管的主要作用是放大、恒流、阻抗变换、可变电阻和电子开关等。

(1) 场效应管具有放大作用。图 4-27 为场效应管放大器电路，输入信号 U_i 经 C_1 耦合至场效应管 VT 的栅极，与原来的栅极负偏压相叠加，使其漏极电流 I_D 相应变化，并在负载电阻 R_D 上产生压降，经 C_2 隔离直流后输出，在输出端即得到放大的信号电压 U_o 。 I_D 与 U_i 同相， U_o 与 U_i 反相。由于场效应管放大器的输入阻抗很高，因此耦合电容可以容量较小，不必使用电解电容器。

(2) 场效应管可以方便地用作恒流源。图 4-28 为场效应管恒流源电路。恒流原理是：如果通过场效应管的漏极电流 I_D 因故增大，源极电阻 R_s 上形成的负栅压也随之增大，迫使 I_D 回落；反之亦然，使 I_D 保持恒定。恒定电流 $I_D = \left| \frac{U_p}{R_s} \right|$ 。式中， U_p 为场效应管夹断电压。

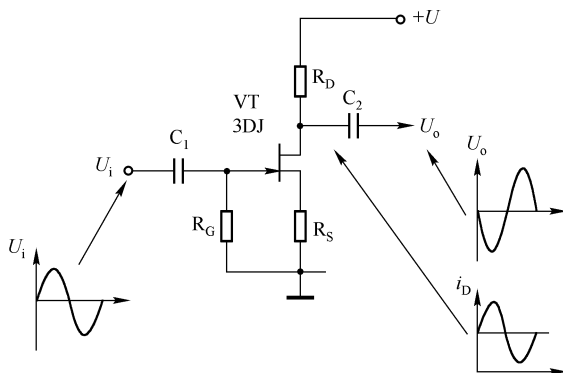


图 4-27 场效应管放大电路

(3) 场效应管很高的输入阻抗非常适合用作阻抗变换。图 4-29 为场效应管源极输出器电路。电路结构与晶体三极管射极跟随器相类似，但由于场效应管是电压控制型器件，输入阻抗极高，因此场效应管源极输出器具有更高的输入阻抗 Z_i 和较低的输出阻抗 Z_o ，常用于多级放大器的高阻抗输入级作为阻抗变换。

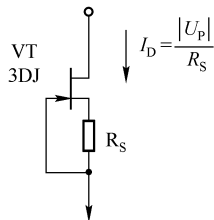


图 4-28 场效应管恒流电路

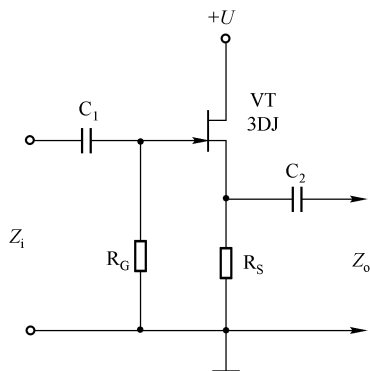


图 4-29 源极输出器电路

(4) 场效应管可以用作可变电阻。图 4-30 为自动电平控制



电路。当输入信号 U_i 增大导致 U_o 增大时，由 U_o 经二极管 VD 负向整流后形成的栅极偏压 $-U_G$ 的绝对值也增大，使场效应管 VT 的等效电阻增大， R_1 与等效电阻的分压比减小，使进入放大器的信号电压减小，最终使 U_o 保持基本不变。

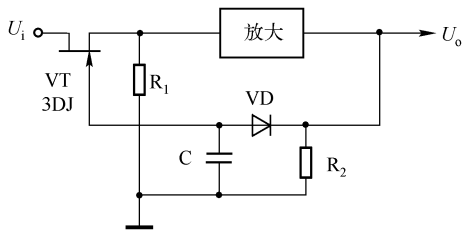


图 4-30 场效应管用作可变电阻

(5) 场效应管还可以用作电子开关。图 4-31 为直流信号调制电路，场效应管 VT_1 、 VT_2 工作于开关状态，其栅极分别接入频率相同、相位相反的方波电压。当 VT_1 导通、 VT_2 截止时， U_i 向 C 充电；当 VT_1 截止、 VT_2 导通时，C 放电；其输出 U_o 便是与输入直流电压 U_i 相关的交变电压。

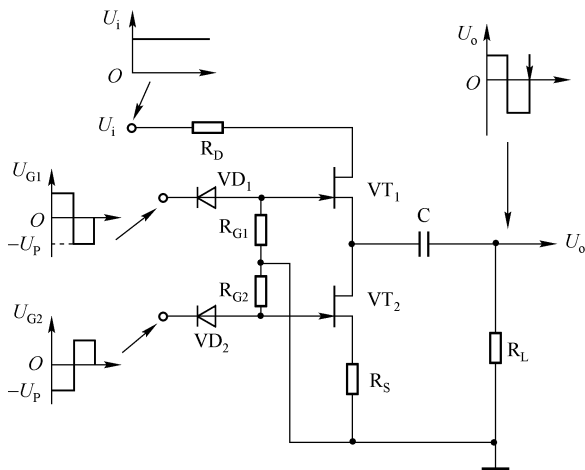


图 4-31 场效应管用作电子开关

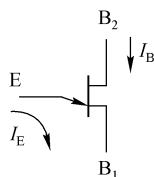


4.5 单结晶体管的符号和作用

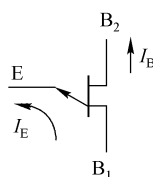
单结晶体管又称双基极二极管，是一种具有一个 PN 结和两个欧姆电极的负阻半导体器件，如图 4-32 所示。单结晶体管可分为 N 型基极单结晶体管和 P 型基极单结晶体管两大类，其引脚及电流方向如图 4-33 所示。



图 4-32 单结晶体管



(a) N 型基极管



(b) P 型基极管

图 4-33 单结晶体管的极性



4.5.1 单结晶体管的符号


单结晶体管的图形符号和文字符号见表 4-5。

表 4-5 单结晶体管的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
P 型基极单结晶体管		V	左为发射极 E， 上为第二基极 B_2 ， 下为第一基极 B_1



续表

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
N 型基极单结晶体管		V	左为发射极 E, 上为第二基极 B_2 , 下为第一基极 B_1

4.5.2 单结晶体管的作用

单结晶体管的特点是具有负阻特性，即在一定范围内，随着电流的增加，电压反而减小。

单结晶体管的基本工作原理如图 4-34 所示（以 N 型基极单结晶体管为例）。当发射极电压 U_E 大于峰点电压 U_p 时，PN 结处于正向偏置，单结晶体管导通。随着发射极电流 I_E 的增加，大量空穴从发射极注入硅晶体，导致发射极与第一基极间的电阻急剧减小，其间的电压也就减小，呈现出负阻特性。单结晶体管的电压 - 电流特性曲线如图 4-35 所示。

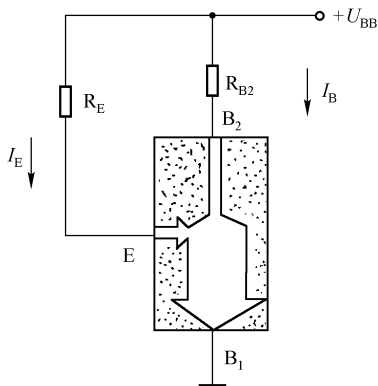


图4-34 单结晶体管的基本工作原理

单结晶体管的主要作用是构成振荡、延时和触发电路，并可使电路结构大为简化。

(1) 单结晶体管可以用作弛张振荡器。图 4-36 为弛张振



荡器电路。单晶体管 V 的发射极输出锯齿波，第一基极输出窄脉冲，第二基极输出方波。 R_E 与 C 组成充、放电回路，改变 R_E 或 C 的值即可改变振荡周期。该电路振荡周期 $T \approx R_E C \ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right)$ 。式中， \ln 为自然对数，即以 e (2.718) 为底的对数。

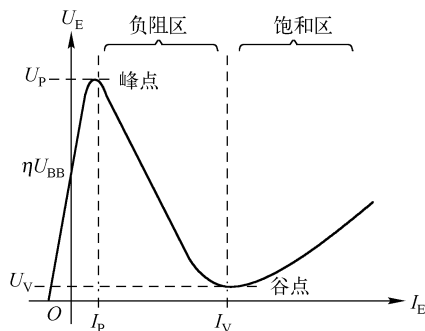


图 4-35 单晶体管的电压-电流特性曲线

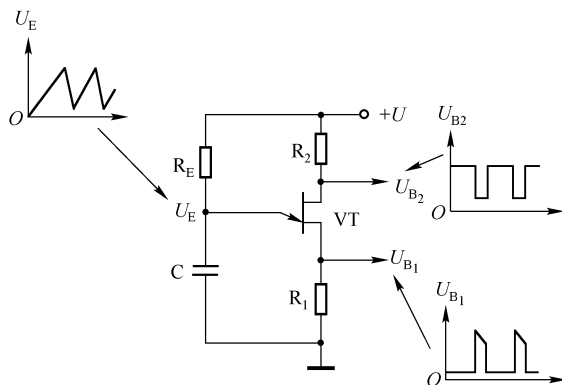


图 4-36 弛张振荡器电路

(2) 单晶体管可以用作延时电路。图 4-37 为延时接通开关电路。电源开关 SA 接通后，继电器 K 并不立即吸合，这时电



源经 R_P 和 R_1 向 C 充电，直到 C 上所充电压达到峰点电压 U_p 时，单结晶体管 V 导通， K 才吸合。接点 K_{-1} 和 K_{-2} 使 K 保持吸合状态。调节 R_P 的值可改变延时时间。

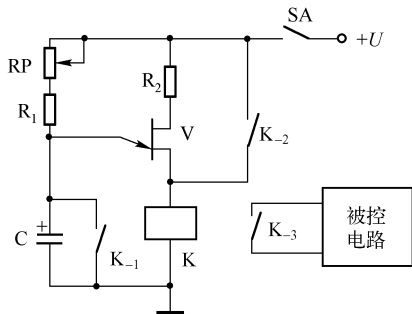


图 4-37 延时接通开关电路

(3) 单结晶体管还可以用作晶闸管触发电路。图 4-38 为调光台灯电路，在交流电的每半周内，晶闸管 VS 由单结晶体管 V 输出的窄脉冲触发导通，调节 R_P 的值可改变单结晶体管 V 输出窄脉冲的时间，也就是改变晶闸管 VS 的导通角，从而改变流过灯泡 EL 的电流，实现调光的目的。

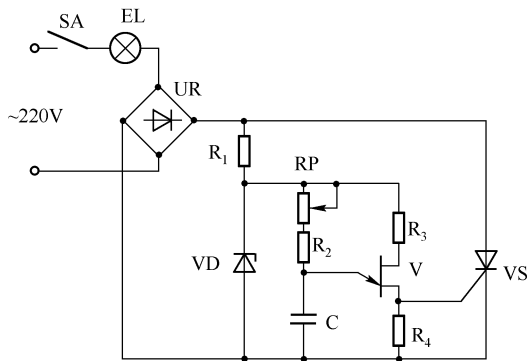


图 4-38 调光台灯电路



4.6 晶体闸流管的符号和作用

晶体闸流管简称为晶闸管，也叫做可控硅，是一种具有 3 个 PN 结的功率型半导体器件，如图 4-39 所示。晶体闸流管包括单向晶闸管、双向晶闸管和可关断晶闸管等种类。

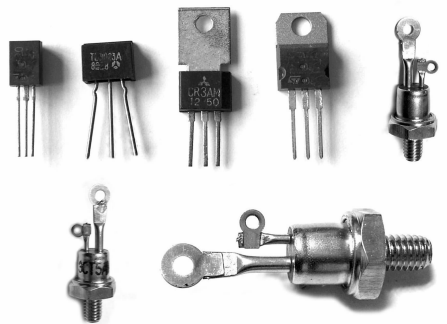


图 4-39 晶体闸流管



4.6.1 晶体闸流管的符号

晶体闸流管的图形符号和文字符号见表 4-6。

表 4-6 晶体闸流管的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
反向阻断二极晶闸管		VS	左为正极， 右为负极
反向导通二极晶闸管		VS	左为正极， 右为负极
双向二极晶闸管		VS	



续表

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
三极晶体闸流管		VS	当不必规定控制极类型时，本符号用于表示反向阻断三极晶闸管
反向阻断三极晶闸管， N 型控制极 (阳极侧受控)		VS	左为正极， 右为负极， 下为控制极
反向阻断三极晶闸管， P 型控制极 (阴极侧受控)		VS	左为正极， 右为负极， 下为控制极
可关断三极晶闸管		VS	未规定控制极
可关断三极晶闸管， N 型控制极		VS	阳极侧受控
可关断三极晶闸管， P 型控制极		VS	阴极侧受控
反向阻断四极晶闸管		VS	
双向三极晶闸管， 三端双向晶闸管		VS	下为控制极
反向导通三极晶闸管		VS	未规定控制极
反身导通三极晶闸管， N 型控制极 (阳极侧受控)		VS	左为正极， 右为负极， 下为控制极
反向导通三极晶闸管， P 型控制极 (阴极侧受控)		VS	左为正极， 右为负极， 上为控制极
光控晶体闸流管		VS	左为正极， 右为负极， 下为控制极

4.6.2 晶体闸流管的作用

晶体闸流管的特点是具有可控的导电性，并且一经触发后即



可自行维持导通状态。

单向晶闸管是PNPN 四层结构,形成3个PN结,具有3个外电极:阳极A、阴极K和控制极G,可等效为PNP、NPN两晶体管组成的复合管,如图4-40所示。在A、K间加上正电压后,管子并不导通。当在控制极G加上正电压时,VT₁、VT₂相继迅速导通,此时即使去掉控制极电压管子仍维持导通状态。

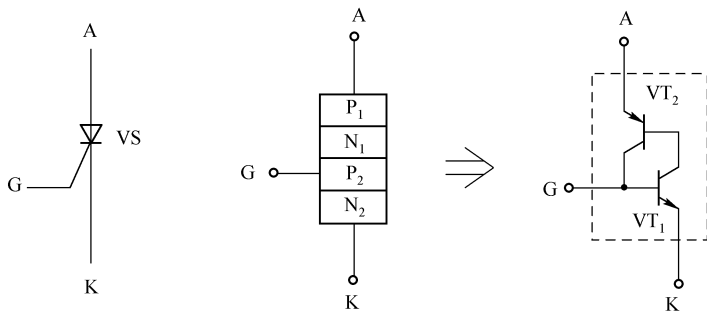


图4-40 晶体闸流管等效电路

双向晶闸管可以等效为两个单向晶闸管的反向并联,如图4-41所示。双向晶闸管可以控制双向导通,因此除控制极G外的另两个电极不再分阳极和阴极,而称为主电极T₁和主电极T₂。

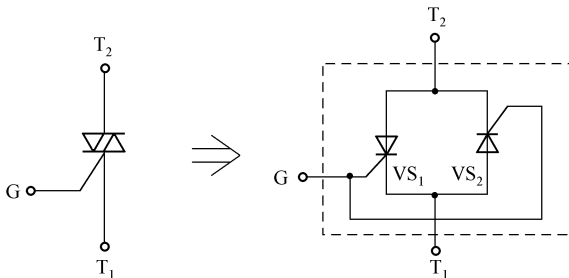


图4-41 双向晶闸管等效电路

普通晶闸管导通后控制极即不起作用,要关断则必须切断电源,使流过晶闸管的正向电流小于维持电流。可关断晶闸管克服



上述缺陷,如图4-42所示,当控制极G加上正脉冲电压时,晶闸管导通,当控制极G加上负脉冲电压时,晶闸管关断。

晶体闸流管的主要作用是构成无触点开关、可控整流、调压、调光、调速和逆变电路等。

(1) 晶闸管可以用作无触点开关。图4-43为报警器电路,VS为单向晶闸管。当探头检测到异常情况时,输出一正脉冲 U_G 至晶闸管VS的控制极,使晶闸管VS导通,报警器持续报警,直至有关人员到场并切断开关S才停止报警。

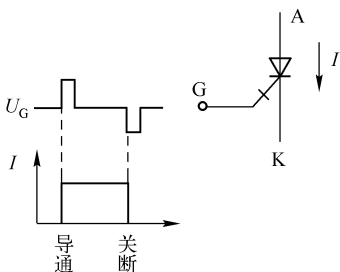


图4-42 可关断晶闸管控制原理

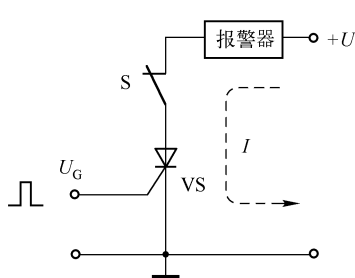


图4-43 报警器电路

双向晶闸管可以用作无触点交流开关。图4-44为交流固态继电器电路,当其输入端加上控制电压时,双向晶闸管VS导通,接通输出端交流电路。

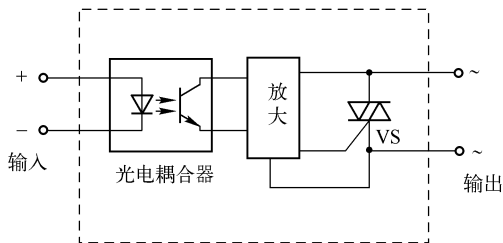


图4-44 交流固态继电器电路

(2) 晶闸管可以用作可控整流。图4-45为可控整流电路,只有当控制极有正触发脉冲 U_G 时,晶闸管 VS_1 、 VS_2 才导通进行



整流，而每当交流电压过零时晶闸管关断。改变触发脉冲 U_G 在交流电每半周内出现的迟早，即可改变晶闸管的导通角，从而改变输出到负载的直流电压的大小。

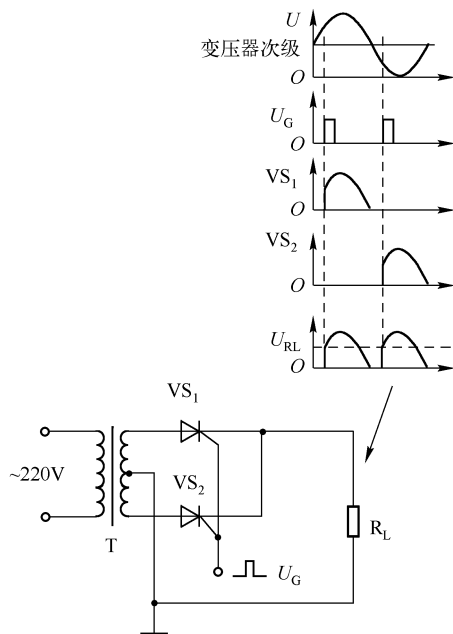


图 4-45 可控整流电路

(3) 双向晶闸管可以用作交流调压器。图 4-46 为交流调压器电路，VS 为双向晶闸管。由 R_P 、 R 和 C 组成充、放电回路， C 上电压作为双向晶闸管 VS 的触发电压。调节 R_P 的值可改变 C 的充电时间，也就改变了 VS 的导通角，达到交流调压的目的。

(4) 可关断晶闸管可以很方便地构成直流逆变电路。如图 4-47 所示， VS_1 和 VS_2 为两个可关断晶闸管，它们的控制极触发电压 U_{G1} 和 U_{G2} 为频率相同、极性相反的正、负脉冲，使得 VS_1 与 VS_2 轮流导通，在变压器次级即可得到频率与 U_G 相同的交流电压。

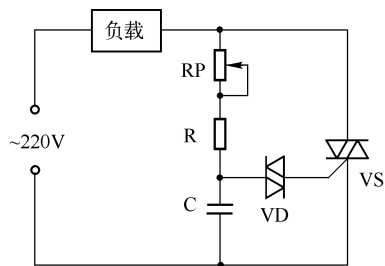


图 4-46 交流调压电路

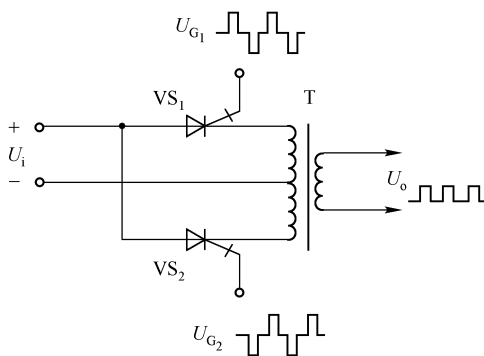




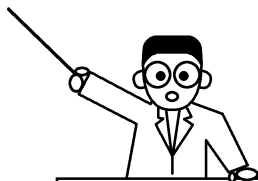


图 4-47 直流逆变电路

第 5 章

集成电路的符号及其 在电路图中的作用

-  5.1 集成运算放大器的符号和作用
-  5.2 常用集成稳压器的符号和作用
-  5.3 时基集成电路的符号和作用
-  5.4 数字电路的符号和作用



看图识电子电路图



现代电子技术中越来越多地运用了集成电路，因此了解和掌握各种集成电路的性能和功能，是看懂集成电路电路图的前提。集成电路包括模拟集成电路和数字集成电路两大类，品种繁多。本章主要介绍集成运算放大器、集成稳压器、时基集成电路和数字电路的符号、特点及主要作用。



5.1 集成运算放大器的符号和作用

集成运算放大器简称集成运放，是一种集成化的高增益的多级直接耦合放大器。根据一个集成电路封装内包含运放单元的数量，集成运放可分为单运放、双运放和四运放。集成运算放大器作为一种通用电子器件，在放大、振荡、电压比较、模拟运算、有源滤波等各种电子电路中得到了越来越广泛的应用。常见集成运算放大器如图 5-1 所示。

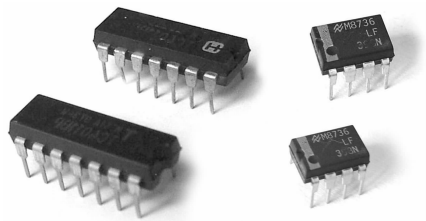


图 5-1 常见集成运算放大器



5.1.1 集成运算放大器的符号

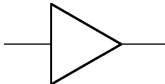
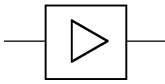
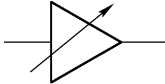
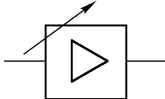
集成运算放大器的图形符号和文字符号见表 5-1。

表 5-1 集成运算放大器的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
运算放大器		N	一般符号， 左为输入端， 右为输出端



续表

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
放大器	 	A	一般符号， 左为输入端， 右为输出端， 三角形指向传输方向
可调放大器	 	A	

5.1.2 集成运算放大器的作用

集成运算放大器的特点是具有极大的开环电压增益。集成运放具有两个输入端（同相输入端 U_+ 与反相输入端 U_- ）和一个输出端 U_o 。其内部电路结构如图 5-2 所示，由高阻抗输入级、中间放大级、低阻抗输出级和偏置电路等组成。输入信号由同相输入端 U_+ 或反相输入端 U_- 输入，经中间放大级放大后，通过低阻输出级输出。中间放大级由若干级直接耦合放大器组成，提供极大的开环电压增益（100dB 以上）。偏置电路为各级提供合适的工作点。

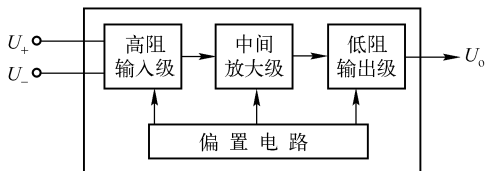


图 5-2 集成运算放大器的内部电路结构



集成运放一般使用正、负对称双电源，有些集成运放，如 LM158、LM324 等，也可使用单电源，如图 5-3 所示。

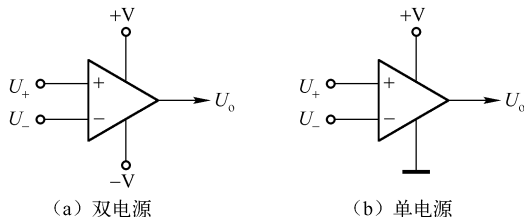


图 5-3 集成运放的电源

集成运放的主要作用是放大、振荡、阻抗变换、有源滤波和精密整流等。

(1) 放大是集成运放最主要的作用。集成运放可以构成反相放大器、同相放大器和差动放大器 3 种基本放大电路。

① 反相放大器电路如图 5-4 所示， R_f 为反馈电阻， R_i 为输入电阻。由于集成运放具有极大的开环电压放大倍数，因此其闭环放大倍数 $A = \frac{R_f}{R_i}$ 。输入电压 U_i 由反相输入端输入，其输出电压 U_o 与输入电压 U_i 相位相反。

② 同相放大器电路如图 5-5 所示， R_f 为反馈电阻， R_i 为输入电阻，其闭环放大倍数 $A = 1 + \frac{R_f}{R_i}$ 。输入电压 U_i 由同相输入端输入，其输出电压 U_o 与输入电压 U_i 相位相同。

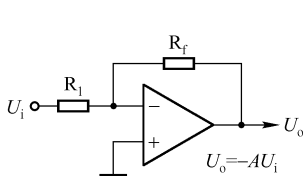


图 5-4 反相放大器电路

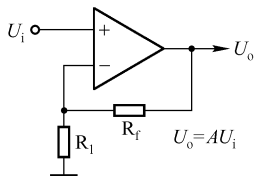


图 5-5 同相放大器电路

③ 差动放大器电路如图 5-6 所示，用来放大两个输入电压



U_1 与 U_2 的差值, 其闭环放大倍数 $A = \frac{R_f}{R_1}$ 。这实际上是一个减法器电路, U_1 为减数电压, U_2 为被减数电压, U_o 为差电压。当取 $R_1 = R_2 = R_f$ 、 $A = 1$ 时, 输出电压 $U_o = U_2 - U_1$, 实现了减法运算。RP 为平衡电阻。

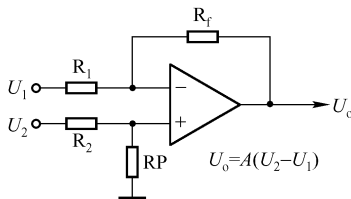


图 5-6 差动放大器电路

集成运放构成的电压放大器电路如图 5-7 所示。这是一个话筒放大器, 驻极体话筒 BM 输出的微弱电压信号经耦合电容 C_1 输入集成运放 IC, 放大后的电压信号经 C_3 耦合输出。电压放大倍数由集成运放外接电阻 R_4 、 R_3 的阻值决定。该电路放大倍数 $A = 100$ 倍 (40dB)。

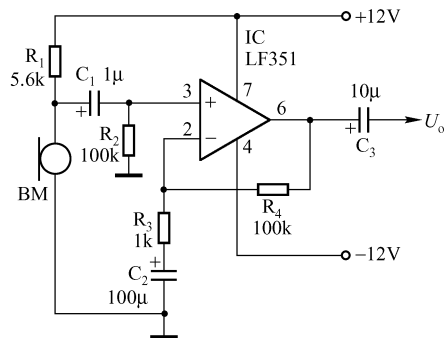


图 5-7 集成运放构成的电压放大器电路

(2) 集成运放可用于振荡电路。图 5-8 为采用集成运放的 800Hz 文氏桥式正弦波振荡器, R_1 、 C_1 和 R_2 、 C_2 构成正反馈回



路,并具有选频作用,使电路产生单一频率的振荡。 R_3 、 R_4 、 R_5 等构成负反馈回路,以控制集成运放 IC 的闭环增益,并利用并联在 R_5 上的二极管 VD_1 、 VD_2 的钳位作用进一步稳定振幅。

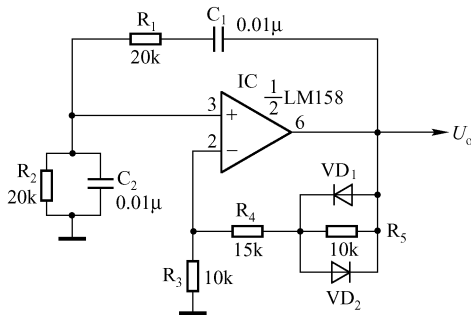


图 5-8 800Hz 文氏桥正弦波振荡器

(3) 集成运放可用作阻抗变换。图 5-9 为集成运放电压跟随器。这是同相放大器的一个特例,其电压放大倍数 $A = 1$, 输出电压 U_o 与输入电压 U_i 大小相等、相位相同。集成运放电压跟随器具有极高的输入阻抗和很小的输出阻抗,常用作阻抗变换器。

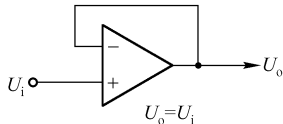


图 5-9 集成运放电压跟随器

(4) 集成运放可以方便地构成有源滤波器,包括低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器等。图 5-10 为音频放大器前级二阶分频电路,分频点为 800Hz。集成运放 IC_1 等构成二阶高通滤波器, IC_2 等构成二阶低通滤波器,将来自前置放大器的全音频信号分频后分别送入两个功率放大器,然后分别推动高音扬声器和低音扬声器。

(5) 集成运放还可用于精密整流电路。图 5-11 为 10mV 有源交流电压表电路。这是一个精密全波整流电路,微安表头 PA 接在整流桥的对角线上。由于集成运放 IC 的高增益和高输入阻抗,消除了整流二极管的非线性影响,提高了测量精度。

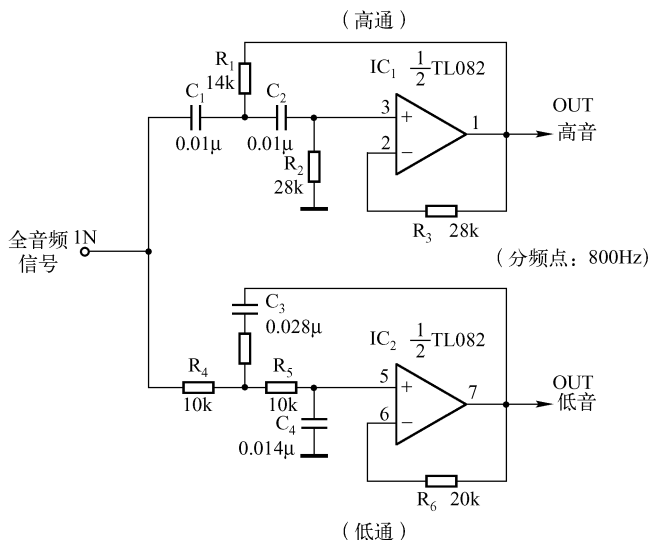


图 5-10 音频放大器前级二分频电路

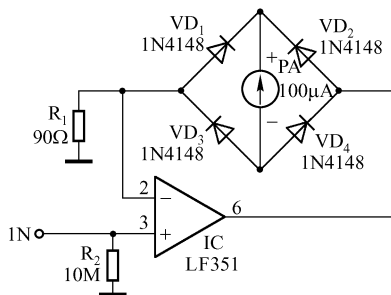


图 5-11 10mV 有源交流电压表电路



5.2 常用集成稳压器的符号和作用

集成稳压器是具有稳压功能的集成电路，能够将不稳定的直流电压变为稳定的直流电压输出。常用集成稳压器如图 5-12 所示。

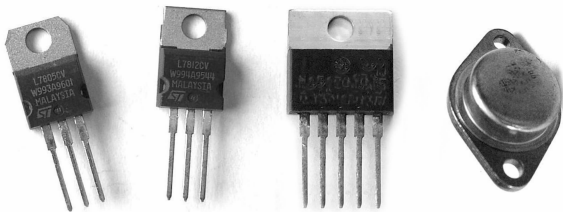


图 5-12 常用集成稳压器

集成稳压器分为串联调整式、并联调整式和开关式稳压器三大类，包括正输出、负输出及正、负对称输出稳压器，固定输出稳压器和可调输出稳压器，三端稳压器和多端稳压器等多种类型，应用最多的是三端固定输出稳压器。

5.2.1 集成稳压器的符号

集成稳压器的图形符号和文字符号见表 5-2。

表 5-2 集成稳压器的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
三端式集成稳压器		IC	一般符号， 左为输入端， 右为输出端
多端式稳压器		IC	左为输入端， 右为输出端

5.2.2 集成稳压器的作用

集成稳压器的特点是稳压精度高、外围电路简单、体积小和质量小。图 5-13 为应用最广泛的串联式集成稳压器内部电路结构方框图。其工作原理是：取样电路将输出电压 U_o 按比例取出，送入比较放大器与基准电压进行比较，差值被放大后去控制调整管，使输出电压 U_o 保持稳定。

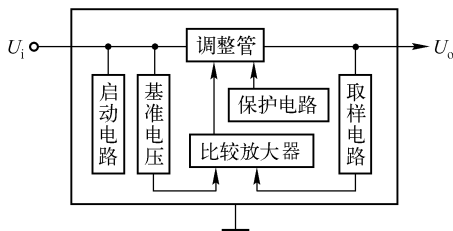


图5-13 串联式集成稳压器电路结构方框图

7800 系列集成稳压器是常用的三端固定正输出集成稳压器，7900 系列集成稳压器是常用的三端固定负输出集成稳压器，具有 1.5A 的电流输出能力，内部含有限流保护、过热保护和过压保护电路，引脚如图 5-14 所示。

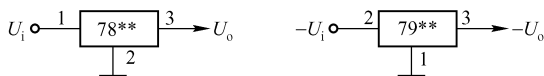


图 5-14 三端固定输出稳压器引脚

CW117 系列为常用的三端可调正输出集成稳压器。CW137 系列为常用的三端可调负输出集成稳压器。其输出电压可调范围的绝对值为 1.2 ~ 37V，输出电流可达 1.5 A，引脚如图 5-15 所示。

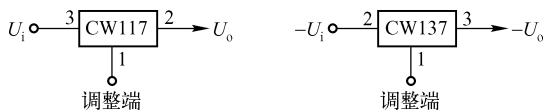


图 5-15 三端可调输出稳压器引脚

集成稳压器的主要作用是稳压，还可以用作恒流源。

(1) 正固定电压稳压。图 5-16 为输出 +9V 直流电压的稳压电源电路，IC 采用集成稳压器 7809， C_1 、 C_2 分别为输入端和输出端滤波电容， R_L 为负载电阻。

(2) 负固定电压稳压。图 5-17 为输出 -9V 直流电压的稳压



电源电路，IC 采用集成稳压器 7909。

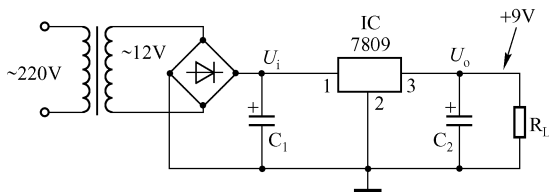


图 5-16 +9V 稳压电源电路

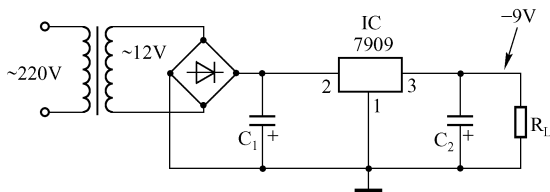


图 5-17 -9V 稳压电源电路

(3) 正、负对称固定电压稳压。图 5-18 为 $\pm 15\text{V}$ 稳压电源电路，IC₁ 采用固定正输出集成稳压器 7815，IC₂ 采用固定负输出集成稳压器 7915。VD₁、VD₂ 为保护二极管，用以防止正或负输入电压有一路未接入时损坏集成稳压器。

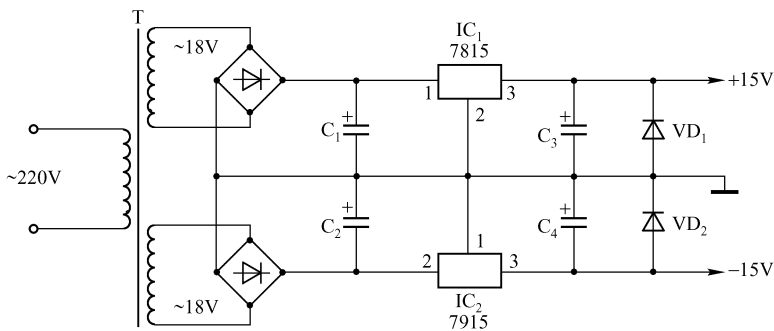


图 5-18 $\pm 15\text{V}$ 稳压电源电路

(4) 可调正电压稳压。图 5-19 为采用 CW117 组成的输出电压



可连续调节的稳压电源电路，输出电压可调范围为 $+ (1.2 \sim 37) \text{ V}$ 。 R_1 与 R_P 组成调压电阻网络，调节电位器 R_P 的阻值即可改变输出电压。 R_P 动臂向上移动时输出电压增大，向下移动时输出电压减小。

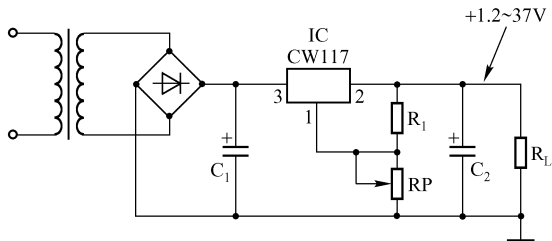


图 5-19 可调整输出稳压电源电路

(5) 可调负电压稳压。图 5-20 为采用 CW137 组成的输出电压可连续调节的稳压电源电路，输出电压可调范围为 $- (1.2 \sim 37) \text{ V}$ 。 R_P 为输出电压调节电位器， R_P 动臂向上移动时输出负电压的绝对值增大，向下移动时输出负电压的绝对值减小。

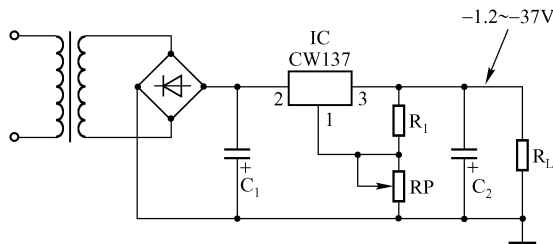


图 5-20 可调负输出稳压电源电路

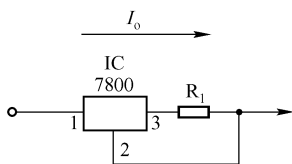


图 5-21 恒流源电路

(6) 集成稳压器还可以用作恒流源。图 5-21 为 7800 稳压器构成的恒流源电路。其恒定电流 I_0 等于 7800 稳压器输出电压与 R_1 的比值。例如，IC 采用 7812， R_1 的阻值为



120Ω，则电路恒定电流 $I_0 = \frac{12}{120} = 0.1 \text{ A}$ 。



5.3 时基集成电路的符号和作用

时基集成电路简称时基电路，是一种能产生时间基准和能完成各种定时或延迟功能的非线性模拟集成电路，如图 5-22 所示。时基集成电路广泛应用于信号发生、波形处理、定时延时、仪器仪表、控制系统、电子玩具等领域。

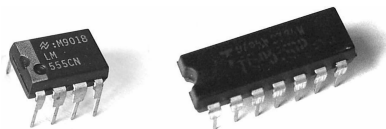


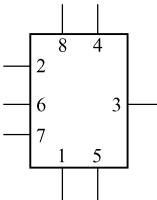
图 5-22 时基集成电路

时基电路有双极型和 CMOS 型两类。双极型时基电路输出电流大、驱动能力强，可直接驱动 200mA 以内的负载。CMOS 型时基电路功耗低、输入阻抗高，更适合作为长延时电路。

5.3.1 时基集成电路的符号

时基集成电路的图形符号和文字符号见表 5-3。

表 5-3 时基集成电路的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
时基集成电路		IC	1 脚为接地端，2 脚为置“1”端，3 脚为输出端，4 脚为复位端，5 脚为控制端，6 脚为置“0”端，7 脚为放电端，8 脚为电源正端



5.3.2 时基集成电路的作用

时基集成电路的特点是将模拟电路与数字电路巧妙地结合在一起,从而可以实现多种用途。图 5-23 为时基集成电路内部电路方框图。第 2 脚为置“1”输入端 \bar{S} , 当 $\bar{S} \leq \frac{1}{3}V_{CC}$ 时, 电路输出端 U_o 为“1”。第 6 脚为置“0”输入端 R, 当 $R \geq \frac{2}{3}V_{CC}$ 时, 电路输出端 U_o 为“0”。第 3 脚为输出端 U_o , 输出端与输入端为反相关系。第 7 脚为放电端, 当 $U_o = 0$ 时, 7 脚导通。第 4 脚为复位端 \overline{MR} , 当 $\overline{MR} = 0$ 时, $U_o = 0$ 。由于电路中分压网络的 3 个电阻 $R_1 \sim R_3$ 的阻值均为 $5k\Omega$, 所以该集成电路又称为 555 时基电路。

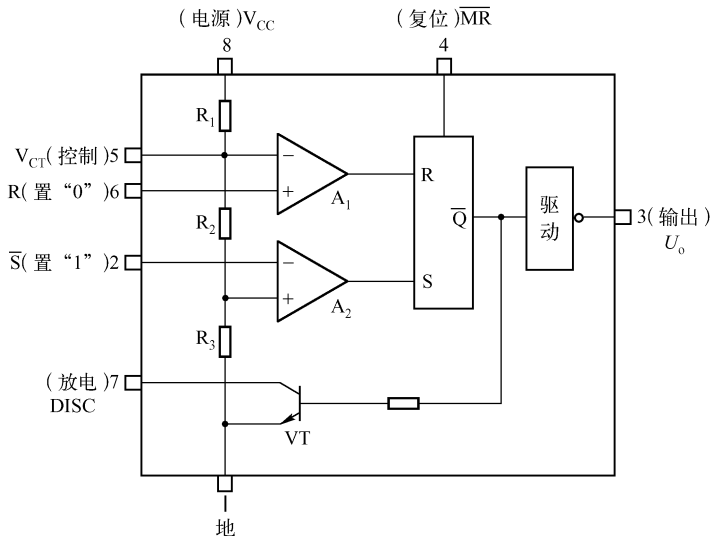


图 5-23 时基集成电路内部电路方框图

时基集成电路可以构成 4 种典型工作模式, 分别是单稳态触发器模式、多谐振荡器模式、双稳态触发器模式和施密特触发器



模式。时基集成电路的主要作用是延时、振荡和整形。

(1) 时基集成电路可构成单稳态触发器,如图 5-24 所示,电阻 R 和电容 C 组成定时电路。当在其输入端 (2 脚) 输入一负触发信号 U_i ($\leq \frac{1}{3}V_{CC}$) 时,输出端 (3 脚) 便输出一正脉冲 U_o , 脉宽 $T_w \approx 1.1RC$ 。

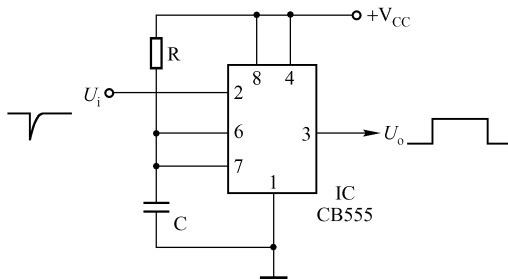


图 5-24 单稳态触发器

时基集成电路构成的单稳态触发器可以用作延时。图 5-25 为自动延时关灯电路。时基集成电路工作于单稳态触发器模式, C_1 、 R_1 为定时元件。按一下 SB , 照明灯 EL 亮, 延时约 25s 后自动关灯。

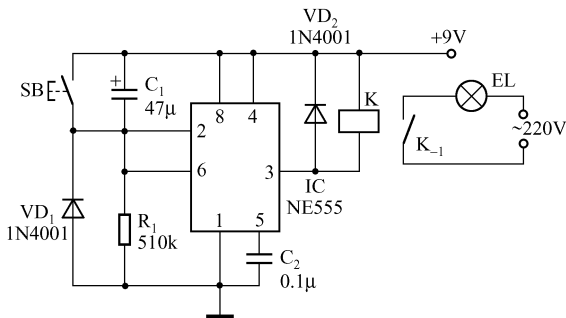


图 5-25 自动延时关灯电路

(2) 时基集成电路可构成多谐振荡器,如图 5-26 所示,



R_1 、 R_2 和 C 组成充、放电回路，使电路形成自激振荡，输出连续方波信号 U_o ，振荡周期 $T \approx 0.7 (R_1 + 2R_2) C$ 。

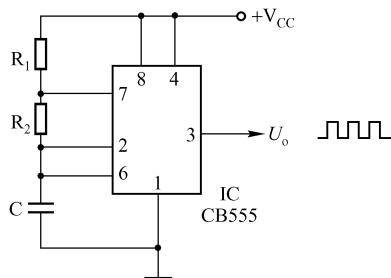


图 5-26 多谐振荡器

图 5-27 为可调脉冲信号发生器电路，时基集成电路工作于多谐振荡器模式， RP_2 为频率调节电位器， RP_1 为占空比调节电位器。该电路可输出 100Hz ~ 10kHz 的方波信号，其占空比可在 5% ~ 95% 之间调节。电路具有两个输出端， OUT_1 输出脉冲方波， OUT_2 输出交流方波。

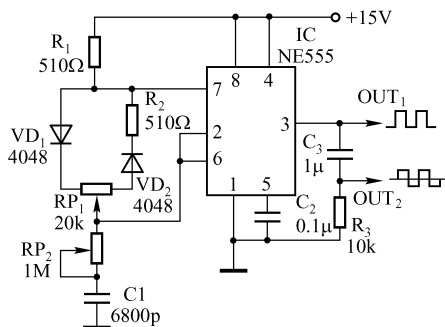


图 5-27 可调脉冲信号发生器电路

(3) 时基集成电路可构成双稳态触发器，如图 5-28 所示， C_1 和 R_1 、 C_2 和 R_2 分别组成置“1”和置“0”的触发微分电路。当有负触发脉冲 U_2 加至置“1”输入端（2 脚）时，输出信号 $U_o = 1$ 。当有正触发脉冲 U_6 加至置“0”输入端（6 脚）时， $U_o = 0$ 。

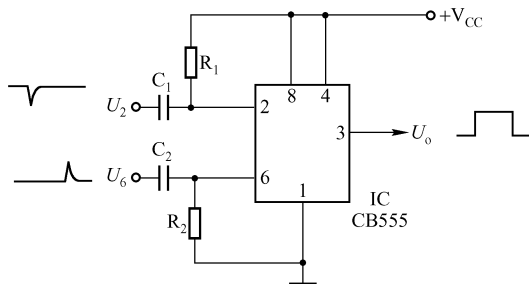


图 5-28 双稳态触发器电路

(4) 时基集成电路可构成施密特触发器, 如图 5-29 所示, 输入信号 U_i 为缓慢变化的模拟信号, 输出信号 U_o 为边沿陡峭的脉冲信号, 输出信号 U_o 与输入信号 U_i 相位相反。

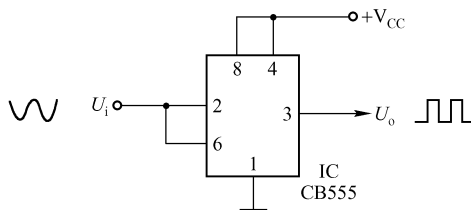


图 5-29 施密特触发器

时基集成电路构成的施密特触发器常被用作整形电路。图 5-30 为光控电路, 时基电路工作于施密特触发器模式, 光电三极管 VT 检测到的缓慢变化的光信号, 被整形为边沿陡峭的脉冲信号输出, 使触发器翻转完成控制动作。

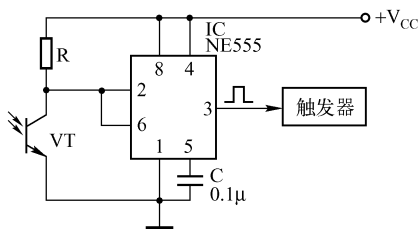


图 5-30 光控电路



5.4 数字电路的符号和作用

数字电路符号主要包括门电路、触发器、信号发生器、编码器、代码转换器、计数器、分配器、移位寄存器、信号转换器、模拟开关、算术单元和存储器等，如图 5-31 所示。

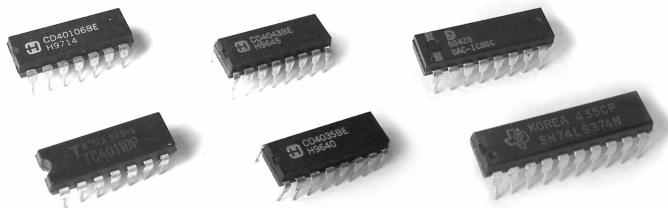


图 5-31 数字电路



5.4.1 数字电路的符号

数字电路的图形符号和文字符号见表 5-4 ~ 表 5-13。

表 5-4 门电路的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
与门		D	左为输入端（输入端数量可增加），右为输出端
或门		D	左为输入端（输入端数量可增加），右为输出端
非门，反相器		D	左为输入端，右为输出端
与非门		D	左为输入端（输入端数量可增加），右为输出端
或非门		D	左为输入端（输入端数量可增加），右为输出端
异或门		D	左为输入端，右为输出端



续表

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
异或非门		D	左为输入端，右为输出端
施密特触发器非门		D	左为输入端，右为输出端
施密特触发器与非门		D	左为输入端（输入端数量可增加），右为输出端

表 5-5 触发器的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
RS 触发器，RS 锁存器		D	左为输入端，右为输出端
边沿上升沿 D 触发器			左为输入端，右为输出端
双 D 锁存器			左为输入端，右为输出端
边沿下降沿 JK 触发器		D	左为输入端，右为输出端
脉冲触发 JK 触发器		D	左为输入端，右为输出端
数据锁定出 JK 触发器		D	左为输入端，右为输出端



续表

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
可重复触发单稳态触发器，通用符号		DM	左为输入端，右为输出端
非重复触发单稳态触发器，通用符号		DM	左为输入端，右为输出端

表 5-6 信号发生器的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
数字信号发生器		D	右为输出端
受控的信号发生器		D	左为控制端，右为输出端
同步启动信号发生器		D	左为控制端，右为输出端
完成最后一个脉冲后停止的信号发生器		D	左为控制端，右为输出端
同步启动、完成最后一个脉冲后停止的信号发生器		D	左为控制端，右为输出端

表 5-7 代码转换器的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
代码转换器，通用符号		D	X、Y 可用输入、输出代码的符号代替



续表

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
4 线 - 10 线译码器 (BCD 输入)		D	左为输入端， 右为输出端
3 线 - 8 线译码器		D	左为输入端， 右为输出端
9 线 - 4 线优先 编码器 (BCD 输出)		D	左为输入端， 右为输出端
8 线 - 3 线优 先编码器		D	左为输入端， 右为输出端



续表

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
4 线 - 7 段译码器/ 驱动器 (BCD 输入)		D	左为输入端， 右为输出端

表 5-8 计数器和分配器的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
计数器, 通用符号 (循环长度为 $2m$)		D	“m” 应以位数代替
计数器, 通用符号 (循环长度为 m)		D	“m” 应以位数代替
多路选择器, 通用符号		D	左为输入端， 右为输出端
多路分配器, 通用符号		D	左为输入端， 右为输出端



表 5-9 移位寄存器的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
移位寄存器，通用符号		DR	“m” 应以位数代替
4 位双向移位寄存器		DR	左为输入端， 右为输出端
8 位移位寄存器 (串入，并出)		DR	左为输入端， 右为输出端

表 5-10 信号转换器的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
模 - 数转换器		D	左为输入端， 右为输出端
数 - 模转换器		D	左为输入端， 右为输出端



续表

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
模 - 数转换器 (4 ~ 20mA - 4 位二进制码)		D	左为输入端, 右为输出端
数 - 模转换器 (n 位二进制码 - $\pm 2V$)		D	左为输入端, 右为输出端

表 5-11 模拟开关的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
双向模拟开关 (常开)		IC	“#” 为数字控制端
单向模拟开关 (常开)		IC	“#” 为数字控制端
双向模拟开关 (常闭)		IC	“#” 为数字控制端
单向模拟开关 (常闭)		IC	“#” 为数字控制端
2 数字信号 “与” 控制的双向转换开关		IC	“#” 为数字控制端



续表

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
同一数字信号控制的 2 双向模拟开关		IC	“#” 为数字控制端

表 5-12 算术单元的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
算术逻辑单元， 通用符号		D	左为输入端， 右为输出端
加法器，通用符号		D	左为输入端， 右为输出端
减法器，通用符号		D	左为输入端， 右为输出端
先行进位产生器， 通用符号		D	左为输入端， 右为输出端
乘法器，通用符号		D	左为输入端， 右为输出端
半加器		D	左为输入端， 右为输出端
全加器		D	左为输入端， 右为输出端





续表

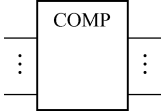
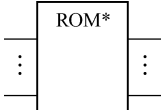
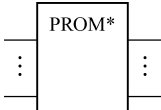
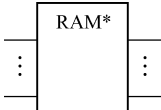
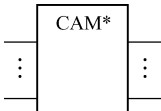
名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
数据比较器，通用符号		D	左为输入端， 右为输出端

表 5-13 存储器的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
只读存储器，通用符号		D	“*”须用地址和位数的符号代替
可编程的只读存储器，通用符号		D	“*”须用地址和位数的符号代替
随机存取存储器，通用符号		D	“*”须用地址和位数的符号代替
内容可寻址存储器，通用符号		D	“*”须用地址和位数的符号代替



5.4.2 门电路的作用

能够实现各种基本逻辑关系的电路通称为门电路。门电路是最基本和最常用的数字电路单元，是构成组合逻辑电路的基本部件，也是构成时序逻辑电路的组成部件之一。

门电路的主要特点是工作于开关状态，处理的是二进制数字信号，即门电路的输入信号和输出信号只有两种状态，即“0”或“1”。

门电路的输出信号与输入信号之间具有特定的逻辑关系，输



出信号的状态仅取决于当时输入信号的状态。门电路的功能可用逻辑表达式表示，并可用逻辑代数进行分析。

基本门电路包括与门、或门、非门（反相器）、与非门、或非门等。

(1) 与门

与门的逻辑关系为 $Y = AB$ ，即只有当所有输入端 A 和 B 均为“1”时，输出端 Y 才为“1”；否则 Y 为“0”。与门真值表见表 5-14。

表 5-14 与门真值表

输 入		输 出
A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

(2) 或门

或门的逻辑关系为 $Y = A + B$ ，即只要输入端 A 和 B 中有一个为“1”时， Y 即为“1”；所有输入端 A 和 B 均为“0”时， Y 才为“0”。或门真值表见表 5-15。

表 5-15 或门真值表

输 入		输 出
A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

(3) 非门

非门的逻辑关系为 $Y = \overline{A}$ ，即输出端 Y 总是与输入端 A 相反，



所以非门又叫反相器。非门真值表见表 5-16。

表 5-16 非门真值表

输 入 A	输 出 Y
0	1
1	0

(4) 与非门

与非门的逻辑关系为 $Y = \overline{AB}$ ，即只有当所有输入端 A 和 B 均为“1”时，输出端 Y 才为“0”；否则 Y 为“1”。与非门真值表见表 5-17。

表 5-17 与非门真值表

输 入		输 出
A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

(5) 或非门

或非门的逻辑关系为 $Y = \overline{A + B}$ ，即只要输入端 A 和 B 中有一个为“1”时， Y 即为“0”；所有输入端 A 和 B 均为“0”时， Y 才为“1”。或非门真值表见表 5-18。

表 5-18 或非门真值表

输 入		输 出
A	B	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0



门电路的主要作用是逻辑控制和多谐振荡器，还可以用作模拟放大器。

例如，在如图 5-32 所示声光控路灯电路中，非门 D_1 、与门 D_2 实现逻辑控制。夜晚无强环境光时，环境光检测电路输出为“0”，经 D_1 反相后为“1”，打开与门 D_2 。这时如有行人的脚步声，则声音检测电路输出为“1”。由于与门 D_2 的两个输入端都为“1”，因此 D_2 输出为“1”使晶体管 VT 导通，继电器吸合，路灯自动点亮。而白天环境光较强时， D_1 输出为“0”，关闭与门 D_2 ，即使有脚步声路灯也不会点亮。

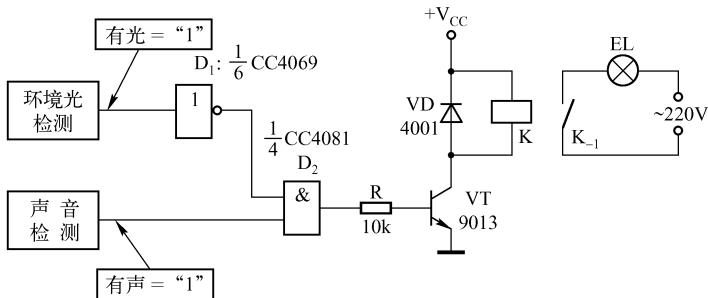


图 5-32 声光控路灯电路

图 5-33 为由门电路构成的门控多谐振荡器电路，由两个与非门 D_1 、 D_2 组成。其中， D_2 两输入端并接作为非门。电路振荡与否受与非门 D_1 的 A 输入端控制。当控制端 $A = 0$ 时，电路停振。当控制端 $A = 1$ 时，电路起振，输出为方波信号，振荡频率 $f = \frac{1}{2.2RC}$ 。按如图 5-33 所示电路，振荡频率 $f = 900\text{Hz}$ ，可通过改变 R 、 C 的阻值改变振荡频率。

图 5-34 为由门电路构成的模拟电压放大器电路，由 3 个非门 D_1 、 D_2 、 D_3 串接而成。 R_2 为反馈偏置电阻，将 3 个非门的工作点偏置在 $\frac{1}{2}V_{DD}$ 附近。 R_1 为输入电阻。电路的电压放大倍数

$A = \frac{R_2}{R_1}$ ，按图中参数放大倍数 $A = 100$ 倍。

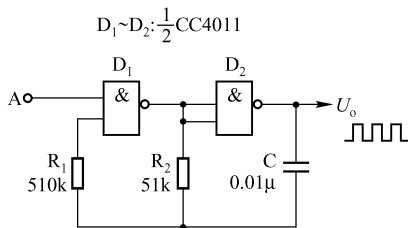


图 5-33 门控多谐振荡器电路

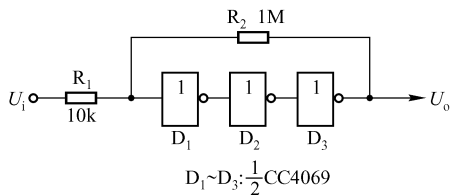


图 5-34 模拟电压放大器电路

5.4.3 触发器的作用

触发器是时序电路的基本单元，在数字信号的产生、变换、存储、控制等方面应用广泛。按结构和工作方式不同，触发器可分为 RS 触发器、D 触发器、JK 触发器、单稳态触发器和施密特触发器等。

触发器的主要特点是具有记忆功能，能够存储前一时刻的输出状态。

触发器具有“0”和“1”两种输出状态，并能在触发信号的触发下相互转换。触发器的输出状态不仅与当时的输入信号有关，而且与前一时刻的输出状态有关。

(1) RS 触发器

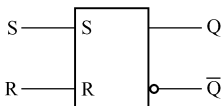


图 5-35 RS 触发器

RS 触发器即复位 - 置位触发器，是最简单的基本触发器，也是构成其他复杂结构触发器的组成部分之一。RS 触发器如图 5-35 所示，具有两个输入端：置



“1”输入端 S、置“0”输入端 R。具有两个输出端：输出端 Q 和反相输出端。

RS 触发器的特点是电路具有 $Q = 1$ 或 $Q = 0$ 两个稳定状态，而且 R 输入端只能使触发器处于 $Q = 0$ 的状态，S 输入端只能使触发器处于 $Q = 1$ 的状态。RS 触发器真值表见表 5-19。

表 5-19 RS 触发器真值表

输 入		输 出	
R	S	Q_1	\bar{Q}
1	0	0	1
0	1	1	0
0	0	不变	
1	1	不确定	

RS 触发器常用于单脉冲产生、状态控制等电路中。

图 5-36 为由 RS 触发器构成的消抖开关电路。这是一个单脉冲产生电路，每按一下按钮开关 SB，电路输出一个单脉冲，完全消除机械开关触点抖动产生的抖动脉冲。当按下 SB 时，输入端 $S = 1$ 使触发器置“1”，输出端 $Q = 1$ 。这时即使 SB 产生机械抖动，只要机械触点不返回到 R 端，输出端 Q 仍保持“1”不变，消除了抖动脉冲信号。同理，当松开 SB 时，输入端 $R = 1$ ，使触发器置“0”，虽然 SB 产生机械抖动，但输出端 Q 仍保持“0”不变。

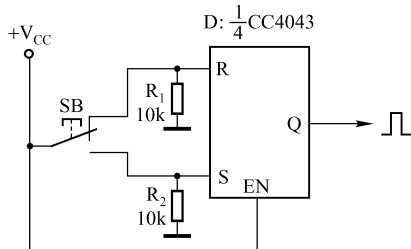


图 5-36 消抖开关电路



图 5-37 为由 RS 触发器构成的触摸开关电路。“开”和“关”为两对金属触摸接点，对电路进行状态控制。当用手触摸“开”接点时，人体电阻将接点接通，电源电压 $+V_{CC}$ 加至 S 端使触发器置“1”，输出端 $Q=1$ ，晶体管 VT 导通，继电器 K 吸合，电灯 EL 点亮。当用手触摸“关”接点时，电源电压 $+V_{CC}$ 加至 R 端使触发器置“0”，晶体管 VT 截止，继电器释放，电灯熄灭。

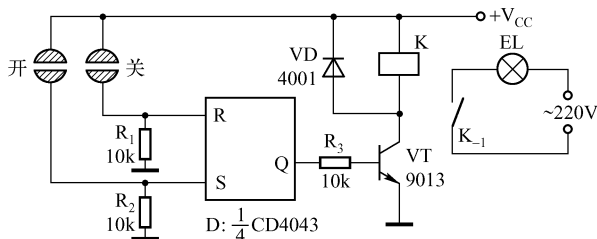


图 5-37 触摸开关电路

(2) D 触发器

D 触发器又称为延迟触发器，是一种边沿触发器。D 触发器具有数据输入端 D、时钟输入端 CP、输出端 Q 和反相输出端 \bar{Q} ，如图 5-38 所示。其中，图 5-38 (a) 为 CP 上升沿触发的 D 触发器，图 5-38 (b) 为 CP 下降沿触发的 D 触发器。

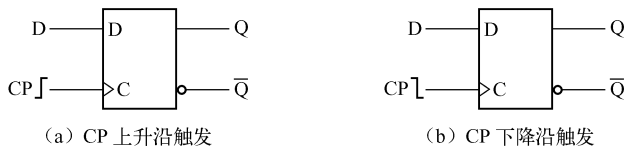


图 5-38 D 触发器

D 触发器的特点是输出状态的改变依赖于时钟脉冲 CP 的触发，即在时钟脉冲边沿的触发下，数据才得以由输入端 D 传输到输出端 Q。没有触发信号时，触发器中的数据则保持不变。上升沿触发型 D 触发器和下降沿触发型 D 触发器的真值表分别见表 5-20 和表 5-21。



表 5-20 D 触发器真值表（上升沿触发）

输 入		输 出	
CP	D	Q	\bar{Q}
	0	0	1
	1	1	0
	任意	不变	

表 5-21 D 触发器真值表（下降沿触发）

输 入		输 出	
CP	D	Q	\bar{Q}
	0	0	1
	1	1	0
	任意	不变	

D 触发器常用于数据锁存、计数和分频等电路中。

图 5-39 为由 4 个 D 触发器构成的四位数据锁存器电路。 $D_1 \sim D_4$ 为数据输入端， $Q_1 \sim Q_4$ 为数据输出端。4 个 D 触发器的时钟输入端并联，在时钟脉冲 CP 上升沿的触发下，将 $D_1 \sim D_4$ 端的数据输入触发器，并从 $Q_1 \sim Q_4$ 端输出。在下一个 CP 脉冲上升沿到来之前，即使 $D_1 \sim D_4$ 输入端的数据消失， $Q_1 \sim Q_4$ 输出端的数据仍不变，实现所谓的“锁存”。

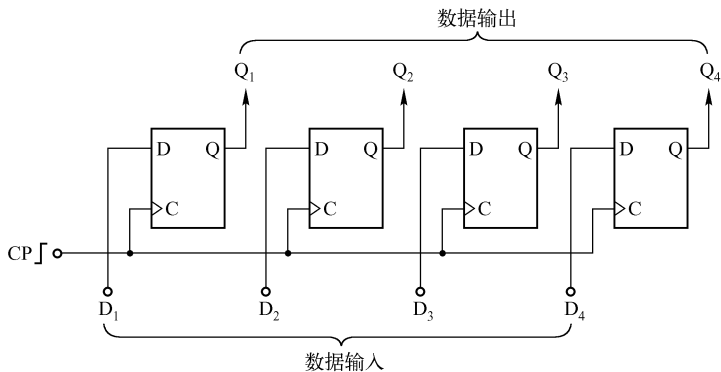


图 5-39 四位数据锁存器电路



图 5-40 为 D 触发器构成的三级分频电路，每个 D 触发器的反相输出端 \bar{Q} 与自身的数据输入端 D 相连接，构成 2 分频单元。三级 2 分频单元串接可实现 8 分频电路。增加串接的分频单元的数量，即可相应增大分频比， n 级 2^n 分频单元串接可实现分频。

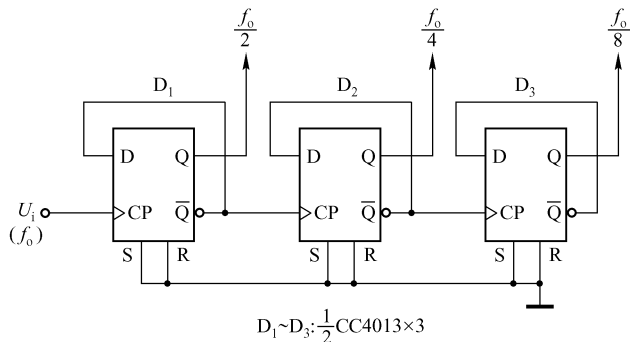


图 5-40 三级分频电路

(3) 单稳态触发器

单稳态触发器是有一个稳态和一个暂稳态的触发器。单稳态触发器如图 5-41 所示。一般具有两个触发端：上升沿触发端 TR_+ 和下降沿触发端 $\overline{TR_-}$ 。具有两个输出端：Q 端和 \bar{Q} 端，Q 和 \bar{Q} 端的输出信号互为反相，另外还具有清零端 \bar{R} 、外接电阻端 R_e 和外接电容端 C_e 。

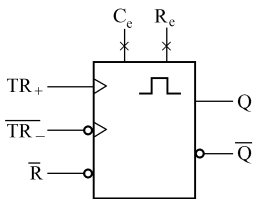


图 5-41 单稳态触发器

单稳态触发器的特点是触发后能够自动从暂稳态回复到稳态。稳态时输出端 $Q = 0$ ，在触发脉冲的触发下，电路翻转为暂稳态 ($Q = 1$)，经过一定时间后又自动回复到稳态 ($Q = 0$)。单稳态触发器被触发后即输出一个恒定宽度的矩形脉冲。该矩形脉冲的宽度由外接定时元件 R_e 和 C_e 的数值决定，而与触发脉冲的



宽度无关。单稳态触发器真值表见表 5-22。

表 5-22 单稳态触发器真值表

输 入			输 出	
R	TR_+	$\overline{TR_-}$	Q	\overline{Q}
1		1		
1	0			
1		0	不触发	
1	1		不触发	
0	任意	任意	0	1

单稳态触发器主要应用于脉冲信号展宽、整形、延迟电路及定时器、振荡器、数字滤波器、频率-电压变换器等。

图 5-42 为由单稳态触发器构成的 100ms 定时器电路，采用 TR_+ 输入端触发，每按一次 SB，输出端 Q 便输出一个宽度为 100ms 的高电平信号。输出脉宽 T_w 由 R_1 和 C 的值决定， $T_w = 0.69R_1C$ 。改变定时元件 R_1 和 C 的大小，即可改变定时时间。

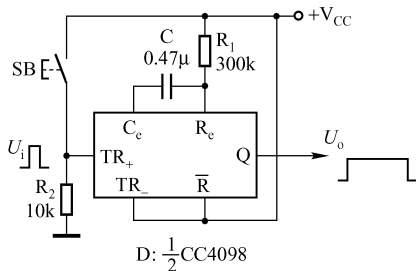


图 5-42 100ms 定时器电路

图 5-43 为带通数字滤波器电路，由两个单稳态触发器构成，单稳态触发器 D_1 的输出脉宽等于输入信号频率上限的周期，单稳态触发器 D_2 的输出脉宽等于输入信号频率下限的周期。当输入信号频率高于上限时，单稳态触发器 D_1 的反相输出端 $\overline{Q_1} = 0$ ，关闭与门 D_3 ，输出端 $U_o = 0$ 。当输入信号频率低于下限时，单稳



态触发器 D_2 的输出端 $Q_2 = 0$ ，也使与门 D_3 关闭，输出端 $U_o = 0$ 。

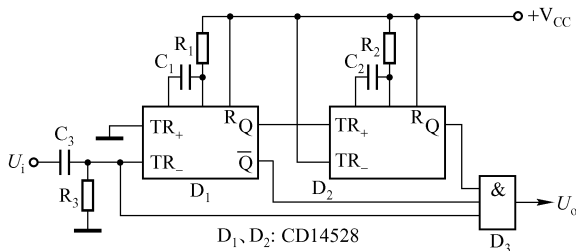


图 5-43 带通数字滤波器电路

只有输入信号频率在所限定的频率范围内时， $\overline{Q_1} = 1$ 并且 $Q_2 = 1$ ，与门 D_3 才打开，允许输入信号通过。由于单稳态触发器 D_1 和 D_2 的输出脉宽分别由外接定时元件 R_1 和 C_1 、 R_2 和 C_2 的数值决定，所以可通过改变这些外接定时元件来选择通带频率的上、下限。

(4) 施密特触发器

施密特触发器是常用的整形电路，可将缓慢变化的电压信号转变为边沿陡峭的矩形脉冲。图 5-44 (a) 为同相输出型施密特触发器，图 5-44 (b) 为反相输出型施密特触发器。施密特触发器具有一个输入端 A 和一个输出端 Q (或) \overline{Q} 。

施密特触发器的特点是具有滞后电压特性，即电路翻转的正向阈值电压 U_{T+} 不等于负向阈值电压 U_{T-} ，而是具有一定的差值，滞后电压 $\Delta U_T = U_{T+} - U_{T-}$ 。图 5-45 为施密特触发器波形图。

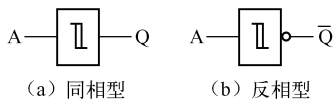


图 5-44 施密特触发器

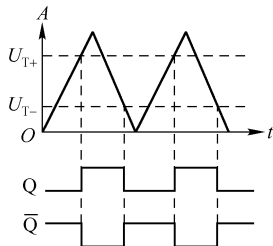


图 5-45 施密特触发器波形图



施密特触发器常用于脉冲整形、电压幅度鉴别、模 - 数转换、多谐振荡器及接口电路等。

图 5-46 为光控电路，施密特触发器用于整形。光线的缓慢变化由光电三极管 VT 接收转换为电信号，施密特触发器 D 将缓慢变化的电信号整形成为边沿陡峭的脉冲信号输出。无光照时，光电三极管 VT 截止，施密特触发器 D 输出端 $U_o = 0$ 。当有光照射到光电三极管 VT 时，VT 导通使施密特触发器 D 输入端为“0”，其输出端 $U_o = 1$ 。

施密特触发器组成多谐振荡器时电路非常简单，仅需外接一个电阻和一个电容，电路如图 5-47 所示。电阻 R 跨接在施密特触发器 D 两端，与电容 C 构成充、放电回路，决定多谐振荡器的振荡频率。改变 R、C 的大小即可改变振荡频率。振荡频率还与电路的电源电压 V_{DD} 、施密特触发器的正、负阈值电压 U_{T+} 、 U_{T-} 有关。电路输出 U_o 为连续的脉冲方波。

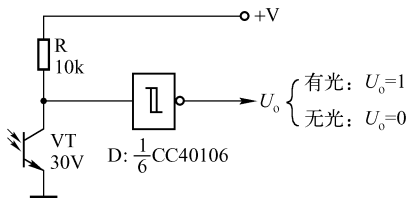


图 5-46 光控电路

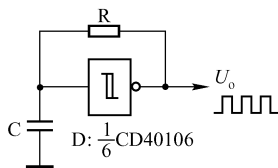


图 5-47 多谐振荡器电路

5.4.4 计数器的作用

计数器是一种计数装置，是数字系统中应用最多的时序逻辑电路。计数器电路具有很多品种，如二进制计数器、十进制计数器、加计数器、减计数器、加/减计数器、可预置计数器、可编程计数器、计数/分配器等。

计数器的主要特点是具有记忆功能，能对输入的脉冲按一定的规则进行计数，并由输出端的不同状态予以表示。图 5-48 (a) 为无预置数输入端的计数器，图 5-48 (b) 为有预置数输入端



(并行数据输入端)的计数器图中, CP 为串行数据输入端(计数输入端), $P_1 \sim P_n$ 为并行数据输入端(预置数端), $Q_1 \sim Q_n$ 为输出端。

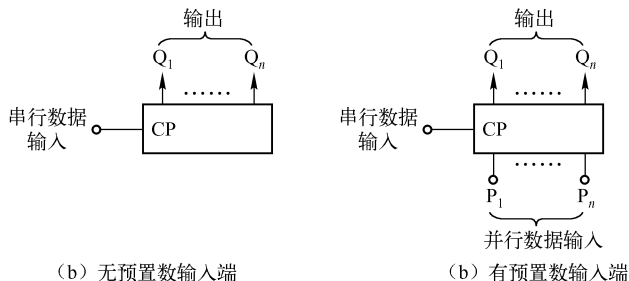


图 5-48 计数器

计数器主要应用于计数、分频、定时、脉冲分配等电路。

(1) 集成计数器可以构成加法计数器、减法计数器、加/减两用计数器等。

图 5-49 为 8 位二进制加法计数器电路, 由两块 4 位集成计数器 CD4520 串行级联而成, 计数信号由 D1 的 CP 端输入, 计数结果由 8 位二进制码表示, 最大计数值为 $2^8 - 1 = 255$ 。SB 为清零按钮。

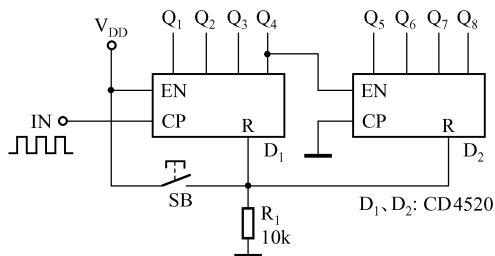


图 5-49 8 位二进制加法计数器电路

图 5-50 为由 CC14526 构成的可预置数的 4 位二进制减法计数器电路。 $S_1 \sim S_4$ 为预置数 ($D_1 \sim D_4$) 的设置开关, 合上为“1”, 断开为“0”。 S_6 为送数开关, 合上时预置数被送入计数器



内, 使 $Q_1 \sim Q_4 = D_1 \sim D_4$ 。计数信号由 CP 端输入做减法计数。 S_5 为清零按钮。

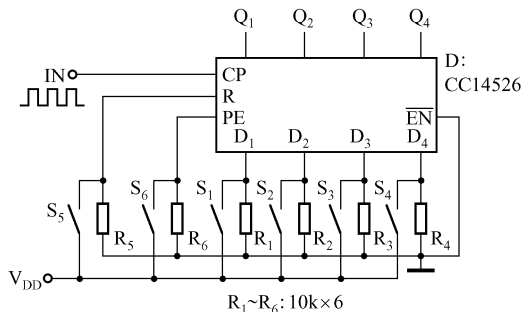


图 5-50 4 位二进制减法计数器电路

图 5-51 为可预置数的 BCD 码加/减两用计数器电路, 采用 CC4510 构成, 既可做加法计数, 又可做减法计数, 由开关 S_3 控制。 S_3 接电源电压 V_{DD} 时, 电路为加法计数器, S_3 接地时, 电路为减法计数器。输出为 4 位二进制数 (8421 码) 表示的十进制数。 S_1 为送数开关, S_2 为清零按钮。

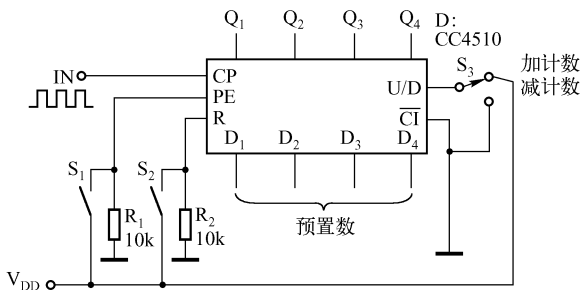


图 5-51 BCD 码加/减两用计数器电路

(2) 集成计数器可用作分频器。图 5-52 为采用 12 位二进制串行计数器 CC4040 构成的十二级分频器电路, 被分频信号由 CP 端输入, 分频后的信号分别由 $Q_1 \sim Q_{12}$ 输出, 最小分频数为 $2^1 = 2$, 最大分频数为 $2^{12} = 4096$, 即 Q_1 端的输出信号频率为输入信



号的 $\frac{1}{2}$, Q_{12} 端的输出信号频率为输入信号的 $\frac{1}{4096}$ 。

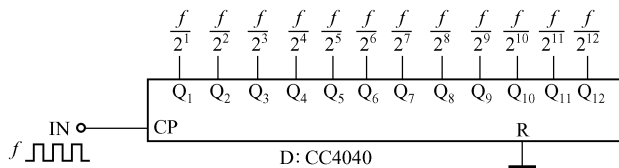


图 5-52 十二级分频器电路

(3) 集成计数器可用作定时器。图 5-53 为采用 14 位二进制计数器 CC4060 构成的多路定时器电路, 具有 10 个输出端 ($Q_4 \sim Q_{10}$ 、 $Q_{12} \sim Q_{14}$), 可同时输出 10 种定时时间, 以分别控制 10 个负载。

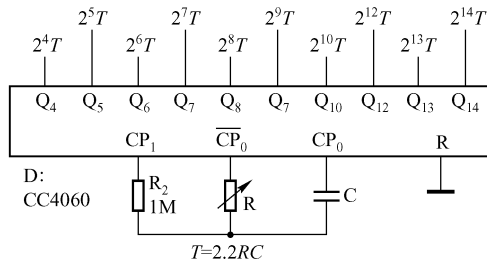


图 5-53 多路定时器电路

集成电路 CC4060 内部包含多谐振荡器和十四级二分频器两部分单元电路。多谐振荡器的作用是产生时钟脉冲, 电路的基本定时时间 T 等于一个时钟脉冲周期, 调节外接定时元件 R 或 C 的值即可改变基本定时时间。

10 个输出端的定时时间分别为基本定时时间 T 的 2^n 倍, 最小为 $2^4 T$ ($16T$), 最大为 $2^{14} T$ ($16384T$)。如果取 $R = 68 \text{ k}\Omega$ 、 $C = 6.8 \mu\text{F}$, 则 $T = 2.2RC \approx 1 \text{ s}$, 那么电路最小定时时间为 16 s , 最大定时时间可达 4 个半小时以上。定时时间到达时, 相应的输出端输出一个“1”信号。



(4) 集成计数器还可用作脉冲信号分配。图 5-54 为采用集成电路 CC4017 构成的十进制计数分配器电路，脉冲信号由 CP 端输入，“1”信号依次出现在 $Y_0 \sim Y_9$ 10 个输出端上，实现对脉冲信号的十进制分配。SB 为清零按钮。

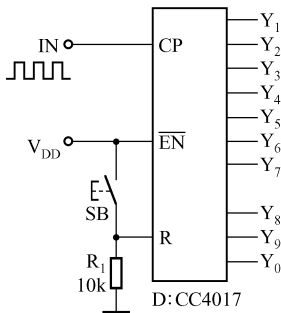


图 5-54 十进制计数分配器电路

5.4.5 译码器的作用

译码器是一种组合逻辑电路，其输出状态是输入信号各种组合的结果。译码器可分为显示译码器和数码译码器两大类。

译码器的主要特点是具有译码功能，能够按照预定的编码规则将一种数码转换成另一种数码。对于每一种输入信号的组合，都会给出对应的输出信号，用以控制后续电路，或者驱动显示器实现数码的显示。

(1) 显示译码器

显示译码器的特点是将输入信号译码后直接驱动显示器件显示出数码来。输入信号可以是二进制码、BCD 码、十进制计数脉冲等。输出端可以驱动 LED（发光二极管）数码管、LCD（液晶）数码管、荧光数码管等。显示译码器的主要作用是译码并驱动显示。

BCD 码 - 7 段显示译码器是一种常用译码器，如图 5-55 所示，A、B、C、D 为 4 个 BCD 码输入端，a ~ g 为 7 个输出端，



分别控制 7 段数码管的 7 个笔画。当输入 4 位 BCD 码时，相应的输出端便会驱动 7 段数码管显示出该 4 位 BCD 码所代表的十进制数字。

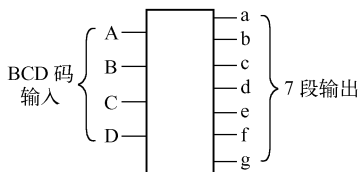


图 5-55 BCD 码 - 7 段显示译码器

图 5-56 为一位 BCD 码译码显示电路，采用 BCD 码锁存/7 段译码/驱动集成电路 CC14544 构成。BCD 码由输入端 A、B、C、D 并行输入，经 CC14544 译码后，驱动共阴极 LED 数码管显示出相应数字。如需要驱动共阳极 LED 数码管，则将 CC14544 的“DFI”端改接到 V_{DD} 即可。

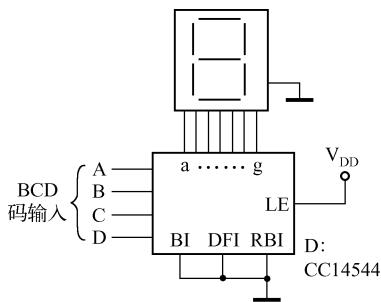


图 5-56 一位 BCD 码译码显示电路

十进制计数 - 7 段显示译码器也是一种常用译码器，如图 5-57 所示。CP 为脉冲信号输入端，R 为清零端，a ~ g 为 7 个输出端。当 CP 端有脉冲信号输入时，电路便对其进行十进制计数，并将计数结果通过 7 个输出端驱动 7 段数码管显示出来。

图 5-58 为两位十进制计数显示电路，由两块十进制计数/7 段译码/驱动集成电路 CC4033 (D_1 、 D_2) 组成。脉冲信号由 D_2



的 CP 端串行输入，计数结果由两个共阴极 LED 数码管显示出两位数字，最大计数值为“99”。SB 为清零按钮。

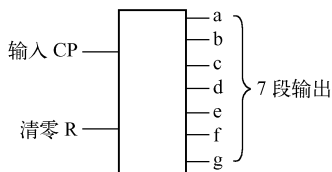


图 5-57 十进制计数 - 7 段显示译码器

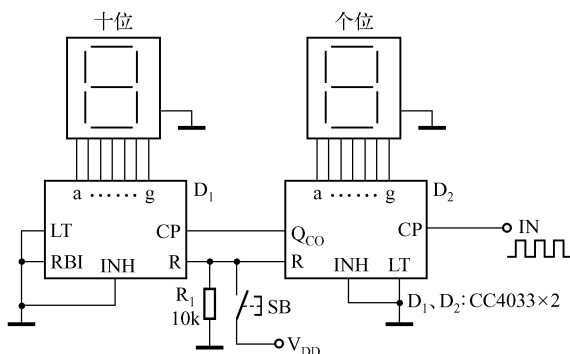


图 5-58 两位十进制计数显示电路

(2) 数码译码器

数码译码器的特点是将一种数码的输入信号译码为另一种数码输出。如图 5-59 所示，数码译码器具有若干个输入端（A、B、…、 n ）和若干个输出端（ Y_1 、 Y_2 、…、 Y_n ），一种数码从输入端输入，从输出端即可得到另一种数码。数码译码器也有多种，如 BCD 码 - 十进制码译码器、十进制码 - BCD 码译码器、4 线 - 16 线译码器、4 选 1 译码/分离器等。数码译码器的主要作用是进行数码转换。

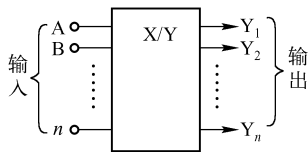


图 5-59 数码译码器

图 5-60 为 BCD 码 - 十进制码译码器 CC4028，具有 4 个输入



端 A、B、C、D，10 个输出端 $Y_0 \sim Y_9$ 。输入信号为 4 位 BCD 码（用 8421 码表示的十进制数），输出信号则是十进制码（ $Y_0 \sim Y_9$ 依次为“1”）。

由于 4 位 8421 码具有 16 种状态，而表示十进制数只需要前 10 种状态，因此后 6 种状态称为“伪码”。CC4028 的逻辑设计采用拒绝伪码方案，当输入代码为“1010”~“1111”时，所有输出端均为 0。利用 CC4028 输入端中的 A、B、C 三位二进制输入，可得到八进制码输出。

图 5-61 为 4 线 - 16 线译码器 CC4514，同样具有 4 个输入端 A、B、C、D，但具有 16 个输出端 $Y_0 \sim Y_{15}$ 。输入信号是四位二进制码，输出信号则是十六进制码（ $Y_0 \sim Y_{15}$ 依次为“1”）。

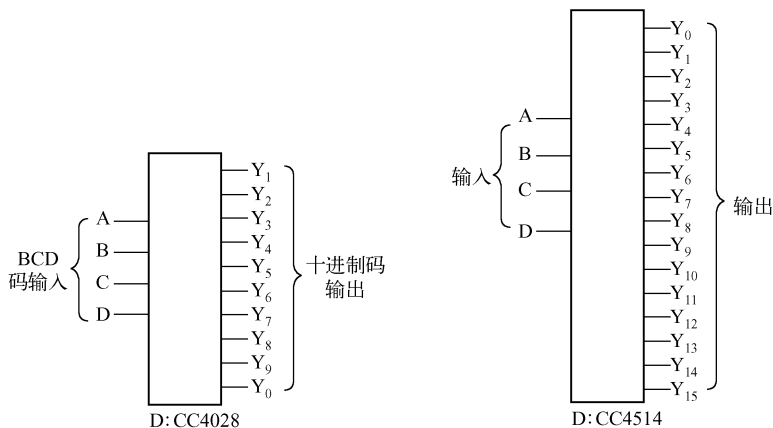


图 5-60 BCD 码 - 十进制码译码器

图 5-61 4 线 - 16 线译码器

5.4.6 移位寄存器的作用

移位寄存器是一种时序逻辑电路。移位寄存器的主要特点是不但可以寄存数据，而且还具有移位的功能，即移位寄存器里存储的数据，可以在时钟脉冲的作用下逐步右移或左移。移位寄存器是数字系统和电子计算机中的一个重要部件，在数据寄存、传



送、延迟、串行-并行转换和并行-串行转换等方面应用广泛。

移位寄存器可分为右移、左移、双向移位等种类。输入方式有串行输入、并行输入、串/并行输入等。输出方式有串行输出、并行输出、串/并行输出等。

图 5-62 为 4 位右移移位寄存器原理示意图。D 为串行数据输入端， Q_4 为串行数据输出端。数据从 D 端串行输入移位寄存器，在时钟脉冲 CP 的作用下逐步向右移位，经过 4 个 CP 周期后从 Q_4 端串行输出。 $Q_1 \sim Q_4$ 为并行数据输出端， $P_1 \sim P_4$ 为并行数据输入端。

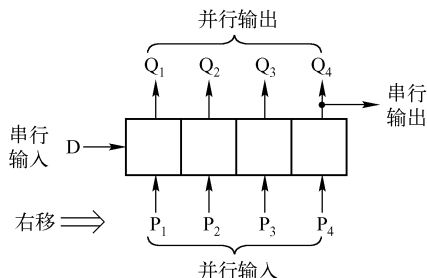


图 5-62 4 位右移移位寄存器原理示意图

图 5-63 为 4 位左移移位寄存器原理示意图。D 为串行数据输入端， Q_1 为串行数据输出端。串行数据从 D 端输入移位寄存器，在时钟脉冲 CP 的作用下逐步向左移位，经过 4 个 CP 周期后从 Q_1 端串行输出。 $Q_1 \sim Q_4$ 为并行数据输出端， $P_1 \sim P_4$ 为并行数据输入端。

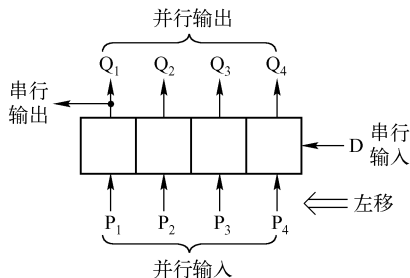


图 5-63 4 位左移移位寄存器原理示意图



移位寄存器的主要作用是数据寄存移位、串行 - 并行数据转换和并行 - 串行数据转换等。

(1) 数据寄存移位

图 5-64 为彩灯控制器电路, 采用两块 4 位静态移位寄存器 CC4035, 其 8 个寄存单元连接成环形, 8 个输出端可控制 8 路彩灯。

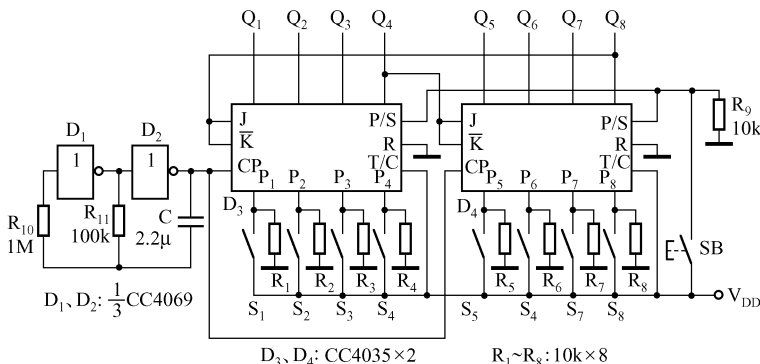


图 5-64 彩灯控制器电路

彩灯的初始状态由预置数开关 $S_1 \sim S_8$ 设置, 开关闭合为“1”, 断开为“0”。按下送数按钮 SB 时, 预置数进入移位寄存器, $Q_1 \sim Q_8$ 等于 $P_1 \sim P_8$ 。松开 SB 后, 移位寄存器各单元的数据便在时钟脉冲的作用下周而复始地向右移动, 由 $Q_1 \sim Q_8$ 控制的彩灯也就流动起来。

非门 D_1 、 D_2 等构成多谐振荡器, 为移位寄存器提供时钟脉冲, 调节 R_{11} 的值可改变振荡频率, 即调节彩灯的流动速度。

图 5-65 为 4 位双向移位寄存器 CC40194, 既可以右移, 也可以左移, 既可以串行输入/输出, 也可以并行输入/输出。CC40194 具有两个控制端 ST_1 和 ST_2 , 用以控制移位寄存器的置数、右移、左移、保持等功能, 见表 5-23。

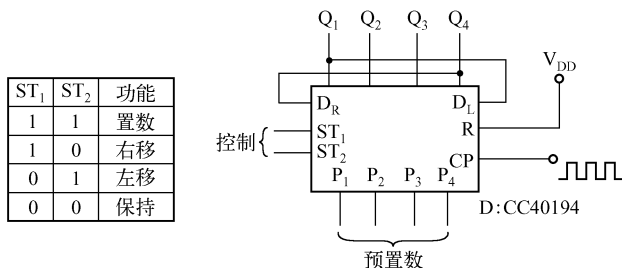


图 5-65 4 位双向移位寄存器

表 5-23 CC40194 控制功能表

控 制 端		功 能
ST ₁	ST ₂	
1	1	置数
1	0	右移
0	1	左移
0	0	保持

(2) 串行 - 并行数据转换

图 5-66 为 8 位串行 - 并行数据转换电路。IC₁ 为串入 - 并出移位寄存器 CD4015，内含两组独立的 4 位移位寄存器，将其级

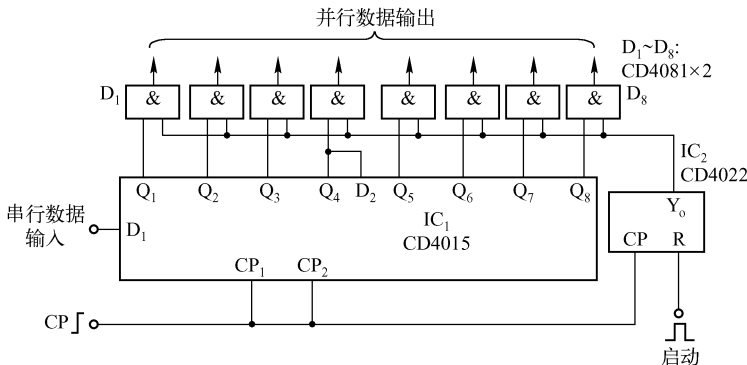


图 5-66 8 位串行 - 并行数据转换电路



联使用构成 8 位移位寄存器。IC₁ 的 8 个并行数据输出端 $Q_1 \sim Q_8$ 分别经 8 个与门 $D_1 \sim D_8$ 输出。IC₂ 为八进制计数分配器 CD4022，其输出端 Y_0 控制着 8 个与门。

当在 IC₂ 的启动端加上一正脉冲时， $Y_0 = 1$ ，与门 $D_1 \sim D_8$ 打开，IC₁ 输出端 $Q_1 \sim Q_8$ 的数据并行输出。在时钟脉冲 CP 上升沿的作用下，串行输入数据由 IC₁ 的 D_1 端逐步移入 IC₁，每经过 8 个时钟脉冲，IC₁ 中的数据全部更新一次。同时，每经过 8 个时钟脉冲，IC₂ 的 Y_0 端输出一个“1”信号，打开 8 个与门使数据并行输出。

(3) 并行 - 串行数据转换

图 5-67 为 8 位并行 - 串行数据转换电路。IC₁ 为八进制计数分配器 CD4022。IC₂ 为 8 位并入 - 串出移位寄存器 CD4014，并行数据由 $P_1 \sim P_8$ 端输入，串行数据由 Q_8 端输出。 P/S 端为并行/串行控制端，受 IC₁ 输出端 Y_0 的控制。

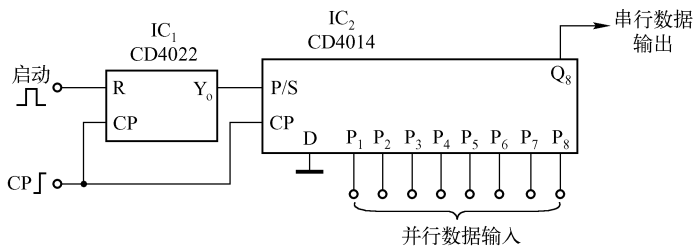


图 5-67 8 位并行 - 串行数据转换电路

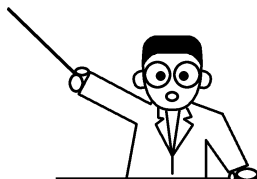
每经过 8 个时钟脉冲，IC₁ 的 Y_0 端便输出一个“1”，使 IC₂ 的控制端 $P/S = 1$ ，让 $P_1 \sim P_8$ 端的输入数据并行进入 IC₂；然后 $Y_0 = P/S = 0$ ，IC₂ 中的数据在时钟脉冲 CP 上升沿的作用下右移并从 Q_8 端串行输出。

第 6 章

换能器件的符号及其在 电路图中的作用

 6.1 光电器件的符号和作用

 6.2 电声器件的符号和作用



看图识电子电路图



换能器件是指能够将非电信号与电信号互相转换的电子器件，它们在电路中起着传感和换能作用。本章主要介绍光电器件和电声器件。



6.1 光电器件的符号和作用

光电器件是指能进行光能与电能相互转换的电子器件，包括将光信号转换为电信号的光敏器件，如光电二极管、光电三极管、光电耦合器等，以及将电信号转换为光信号的电致发光器件，如发光二极管、LED 数码管等。

6.1.1 光电器件的符号

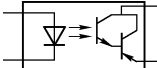
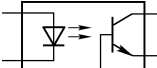
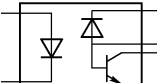
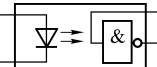
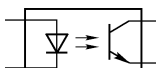
光电器件的图形符号和文字符号见表 6-1。

表 6-1 光电器件的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
光电二极管		VD	左为正极，右为负极
光电池		BP	长线为正极，短线为负极
PNP 型光电三极管		VT	上为发射极 e，下为集电极 c
NPN 型光电三极管		VT	上为集电极 c，下为发射极 e
半导体激光器			左为正极，右为负极
发光数码管			
光电二极管型光耦合器			



续表

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
达林顿型光耦合器			
光电三极管型光耦合器			
光电二极管和 NPN 型三极管光耦合器			
集成电路光耦合器			
光耦合器, 光隔离器			示出发光二极管和 光电三极管

6.1.2 光电二极管的作用

光电二极管是一种常用的光敏器件, 如图 6-1 所示。与晶体二极管相似, 光电二极管也是具有一个 PN 结的半导体器件, 所不同的是光电二极管有一个透明的窗口, 以便使光线能够照射到 PN 结上。



图 6-1 光电二极管

光电二极管的特点是具有将光信号转换为电信号的功能。光电二极管工作在反向电压状态, 其光电流 (反向电流) 的大小与光照强度成正比, 光照越强, 反向电流越大, 如图 6-2 所示。

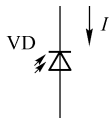


图 6-2 光电二极管
的工作原理

光电二极管的作用是进行光电转换，在光控、红外遥控、光探测、光纤通信、光电耦合等方面有广泛的应用。

(1) 光电二极管可以用作光控开关。

其电路如图 6-3 所示，无光照时，光电二极管 VD_1 因接反向电压而截止，晶体管 VT_1 、 VT_2 因无基极电流也截止，继电器处于释放状态。当有光线照射到光电二极管 VD_1 时， VD_1 从截止转变为导通，使 VT_1 、 VT_2 相继导通，继电器 K 吸合接通被控电路。

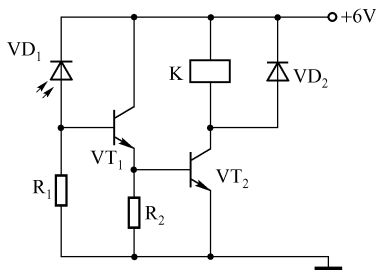


图 6-3 光控电路

(2) 光电二极管可以用作光信号接收。图 6-4 为光信号接收放大电路，光信号由光电二极管 VD 接收并转换为电信号，经 VT 放大后通过耦合电容 C 输出。

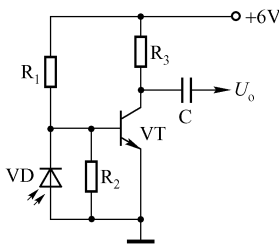


图 6-4 光信号接收放大电路

(3) 光电二极管可以用作红外光到可见光的转换。其电路如图 6-5 所示，红外光信号由光电二极管 VD_1 接收，经晶体管



VT_1 、 VT_2 放大后，驱动发光二极管 VD_2 发出可见光。

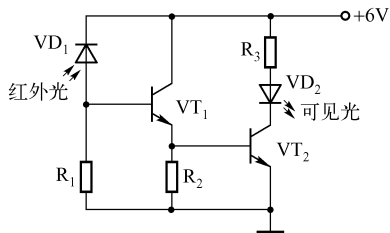


图 6-5 红外光 - 可见光转换电路

6.1.3 光电三极管的作用

光电三极管是在光电二极管的基础上发展起来的半导体光敏器件。与晶体三极管相似，光电三极管也是具有两个 PN 结的半导体器件，所不同的是基极受光信号的控制。由于光电三极管的基极即为光窗口，因此大多数光电三极管只有发射极 e 和集电极 c 两个引脚，基极无引出线，光电三极管的外形与光电二极管几乎一样，如图 6-6 所示。



图 6-6 光电三极管



光电三极管分为 NPN 型和 PNP 型两大类。在有光照时，NPN 型光电三极管电流从集电极 c 流向发射极 e，PNP 型光电三极管电流从发射极 e 流向集电极 c，如图 6-7 所示。

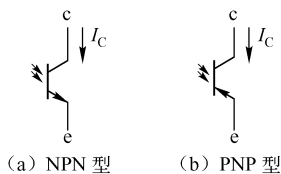


图 6-7 光电三极管的电流

光电三极管的特点是不仅能实现光电转换，而且同时还具有放大功能。光电三极管可以等效为光电二极管和普通三极管的组合元件，如图 6-8 所示。光电三极管基极与集电极间的 PN 结相当于一个光电二极管，在光照下产生的光电流又从基极进入三极管放大，因此光电三极管输出的光电流可达光电二极管的 β 倍。

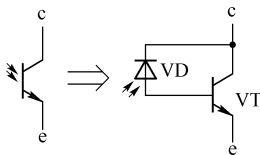


图 6-8 光电三极管等效电路

光电三极管的主要作用是光控。光电三极管本身具有放大作用，给使用带来很大方便。图 6-9 为光控开关电路，由于光控器件采用了光电三极管，因此该电路比使用光电二极管的同类电路简化许多。

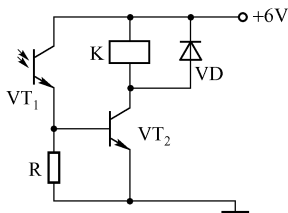


图 6-9 光控开关电路



6.1.4 光电耦合器的作用

光电耦合器是以光为媒介传输电信号的器件，封装形式主要有金属壳封装式、塑料封装式、双列直插式等，如图 6-10 所示。

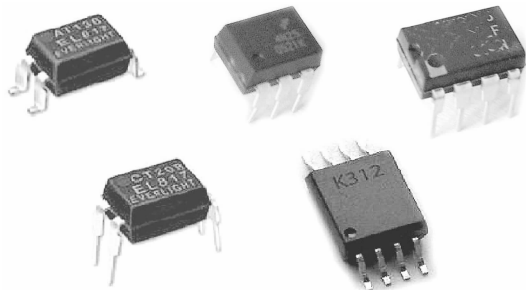


图 6-10 光电耦合器

光电耦合器的特点是可实现电信号的隔离传输，即输入端与输出端之间既能传输电信号，又具有电的隔离性。光电耦合器既可以传输交流信号，又可以传输直流信号。光电耦合器具有传输效率高、隔离度好、抗干扰能力强、寿命长、体积小和质量小的优点。

光电耦合器的主要作用是隔离传输和隔离控制。

(1) 光电耦合器可以用作隔离传输。其电路如图 6-11 所示，以光电三极管型光电耦合器为例，其输入端是一个发光二极管，输出端是一个光电三极管。当输入端加上电源 GB_1 时，电流 I_1 流过发光二极管使其发光，光电三极管接受光照后就在输出端形成光电流 I_2 ，光电流的大小与通过发光二极管的电流大小成正比，从而实现了电信号的传输。由于这个传输过程是通过“电→光→电”的转换完成的， GB_1 与 GB_2 之间并没有电的联系，所以同时实现了输入端与输出端之间的电的隔离。

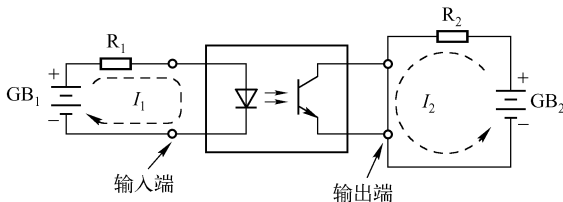


图 6-11 光电耦合器的隔离传输作用电路

(2) 光电耦合器可以用作隔离控制。图 6-12 为交流电钻控制电路，当按下按钮开关 SB 时，3V 电源经限流电阻加至光电耦合器输入端的发光二极管使其发光，光电耦合器输出端的光电三极管导通，产生输出电流，使双向晶闸管 VS 导通，电钻电动机 M 转动。由于光电耦合器的隔离作用，只需控制 3V 低压直流电即可间接控制交流 220V 电源。

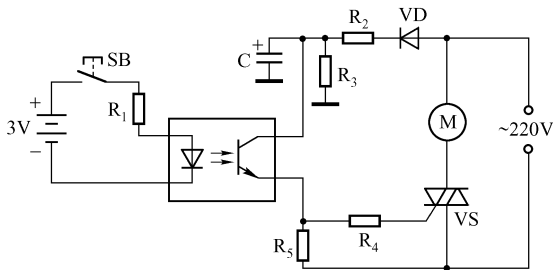


图 6-12 交流电钻控制电路

6.1.5 发光二极管的作用

发光二极管简称为 LED，是一种具有一个 PN 结的半导体电致发光器件。发光二极管种类很多，可分为可见光 LED、红外光 LED、固定颜色 LED、双色 LED 和变色 LED 等，并有圆形、方形、异形等多种形状，如图 6-13 所示。

发光二极管的特点是会发光。发光二极管与普通二极管一样具有单向导电性，所不同的是当有足够的正向电流通过 PN 结



时，便会发出不同颜色的可见光或红外光。



图 6-13 发光二极管

发光二极管的主要作用是指示灯和光发射，广泛应用在显示、指示、遥控和通信领域。

(1) 发光二极管用作指示灯电路。发光二极管的典型应用电路如图 6-14 所示。 R 为限流电阻， I 为通过发光二极管的正向电流。发光二极管的管压降一般比普通二极管大些，约为 2V ，电源电压必须大于管压降，发光二极管才能正常工作。

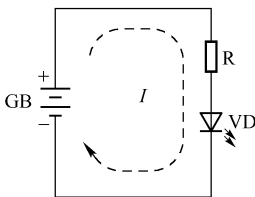


图 6-14 发光二极管的典型应用电路

发光二极管用于交流电源指示灯电路如图 6-15 所示。 VD_1 为整流二极管， VD_2 为发光二极管， R 为限流电阻， T 为电源变压器。

(2) 发光二极管用作光发射管。在红外遥控器、红外无线耳机、红外报警器等电路中，红外发光二极管担任光发射管，电路



如图 6-16 所示，VT 为开关调制晶体管，VD 为红外发光二极管。信号源通过 VT 驱动和调制 VD，使 VD 向外发射调制红外光。

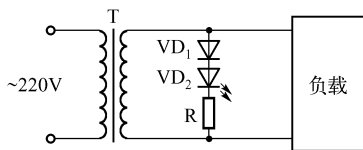


图 6-15 发光二极管用于电源指示灯电路

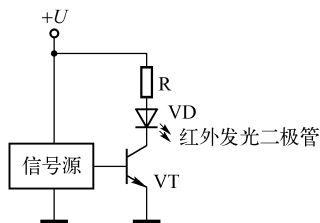


图 6-16 红外光发射电路

(3) 变色发光二极管的特点是发光颜色可以变化。双色发光二极管如图 6-17 所示，将两种发光颜色（常见的为红色和绿色）的管心反向并联后封装在一起。当工作电压为左正、右负时，电流 I_a 通过管心 VD_1 使其发红光。当工作电压为左负、右正时，电流 I_b 通过管心 VD_2 使其发绿光。

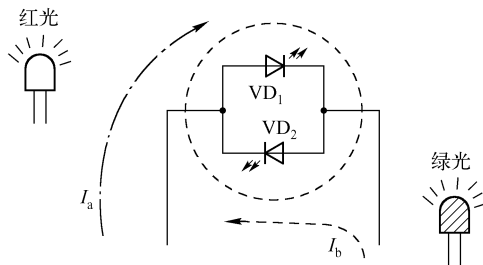


图 6-17 双色发光二极管



变色 LED 是将两种发光颜色（通常为红色和绿色）的管心负极连接在一起作为公共负极，另两引脚分别为红色和绿色管心的正极。电流 I_a 通过管心 VD_1 使其发红光，电流 I_b 通过管心 VD_2 使其发绿光，电流 $I_a = I_b$ 并同时通过管心时，LED 发橙色光，当 I_a 与 I_b 的比例不同时，LED 发光颜色按比例在红—橙—绿之间变化，如图 6-18 所示。

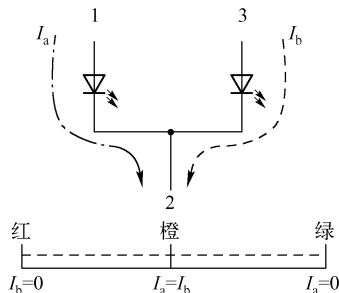


图 6-18 变色发光二极管

4 引脚变色 LED 是将三种发光颜色（如红色、绿色、蓝色）的管心负极连接在一起作为公共负极，另 3 个引脚分别为红色、绿色、蓝色管心的正极，如图 6-19 所示。改变通过各管心的电流，即可根据需要变换其发光颜色。

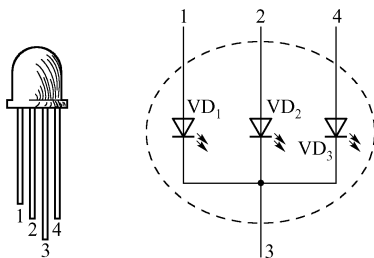


图 6-19 三色发光二极管

6.1.6 LED 数码管的作用

LED 数码管是最常用的一种字符显示器件，是将若干发光



二极管按一定图形组织在一起构成的，包括数字管、符号管，一位、双位和多位数码管等种类，如图 6-20 所示。7 段数码管是应用较多的一种数码管，分为共阴极数码管和共阳极数码管两种。

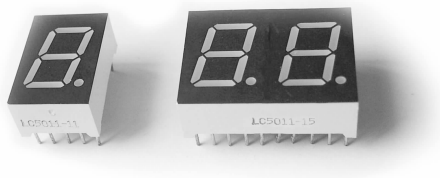


图 6-20 LED 数码管

LED 数码管的作用是显示字符，如在时钟电路中显示时间、在计数电路中显示数字、在测量电路中显示结果等。

(1) 共阴极数码管内部电路如图 6-21 所示，8 个 LED（7 段笔画和 1 个小数点）的负极连接在一起接地，译码电路按需要给不同笔画的 LED 正极加上正电压，使其显示出相应的数字。

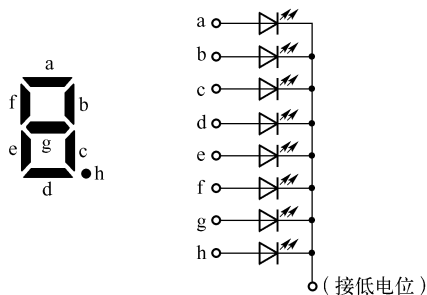


图 6-21 共阴极数码管内部电路

(2) 共阳极数码管内部电路如图 6-22 所示，8 个 LED 的正极连接在一起接正电压，译码电路按需要使不同笔画的 LED 负极接地，使其显示出相应的数字。

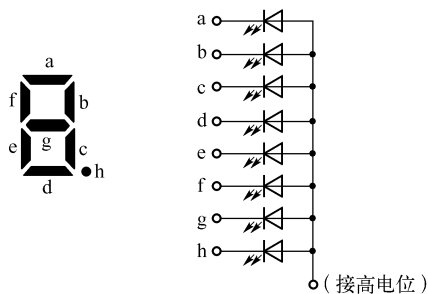


图 6-22 共阳极数码管内部电路



6.2 电声器件的符号和作用

电声器件包括能够将电信号转换为声音信号的扬声器、耳机、讯响器和蜂鸣器，以及能够将声音信号转换为电信号的传声器等。



6.2.1 电声器件的符号

电声器件的图形符号和文字符号见表 6-2。

表 6-2 电声器件的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
传声器（话筒）		BM	一般符号
受话器（耳机）		BE	一般符号
扬声器		BL	一般符号
扬声－传声器		B	



续表

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
唱针式立体声头		B	
单音光敏播放头		B	
单声道录音磁头		B	
单声道放音磁头		B	
单声道录放磁头		B	
消磁磁头		B	
双声道录放磁头		B	
电喇叭		HA	
电铃		HA	
电警笛, 报警器		HA	
蜂鸣器		HA	

6.2.2 扬声器的作用

扬声器俗称喇叭,是一种常用的电声转换器件。扬声器可分为电动式扬声器、压电式扬声器、球顶式扬声器、号筒式扬声器等,如图 6-23 所示。

扬声器的特点是能将电信号转换为声音进行播放。以电动式扬声器为例。其工作原理如图 6-24 所示。音圈位于环形磁钢与心柱之间的磁隙中,当音频电流通过音圈时,所产生的交变磁场



与磁隙中的固定磁场相互作用，使音圈在磁隙中往复运动，并带动与其粘在一起的纸盆运动而发声。



图 6-23 扬声器

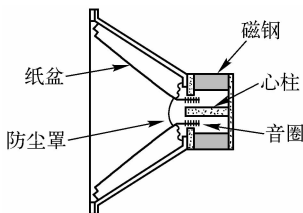


图 6-24 电动式扬声器的结构

扬声器的主要作用是播放声音。

(1) 电动式纸盆扬声器是最常用的扬声器，既有全频扬声器，又有专门的高音、中音、低音扬声器，广泛应用于收音机、录音机、电视机、音响、家庭影院、多媒体计算机等设备，以及公共场所广播等各种场合。图 6-25 为三分频音箱电路。

(2) 球顶式扬声器采用球顶式振膜，具有瞬态响应好、声音清晰明亮的特点，有高音扬声器和中音扬声器两种，主要应用在高档分频式组合音箱中。

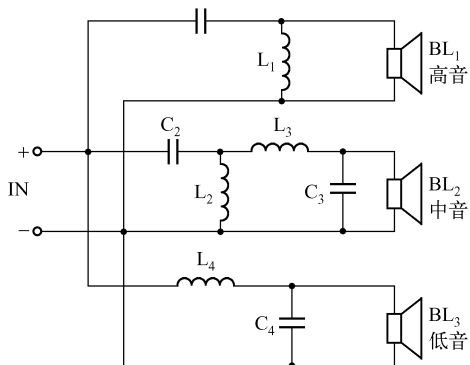


图 6-25 三分频音箱电路

(3) 号筒式扬声器由发音头和号筒两部分组成，号筒起到聚集声音的作用，可以使声音更有效地传播。号筒式扬声器多是高音扬声器，主要应用在要求较高的音箱等还音系统中。室外广播用的高音喇叭也是一种号筒式扬声器。

6.2.3 耳机的作用

耳机也是常用的电声转换器件，一般分为头戴式耳机和耳塞机两大类，同时又分为单声道耳机和立体声耳机两种，如图 6-26 所示。



图 6-26 耳机



耳机的特点和作用是适合于个人聆听。立体声耳机一般均标有左、右声道标志“L”与“R”。使用时，“L”应戴在左耳，“R”应戴在右耳，如图 6-27 所示，这样才能聆听到正常的立体声。

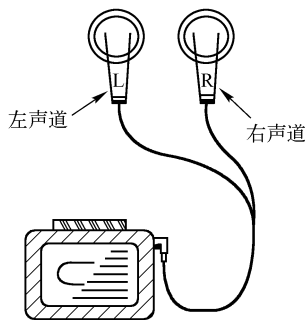


图 6-27 立体声耳机的应用

6.2.4 讯响器的作用

讯响器和蜂鸣器是另一种类的电声转换器件，如图 6-28 所示。



图 6-28 讯响器和蜂鸣器

讯响器和蜂鸣器是运用电磁式原理工作的。其频响范围较



窄、低频响应较差，一般不宜作为还音系统的扬声器。但讯响器和蜂鸣器具有体积小、质量小、灵敏度高、所需驱动功率微小的特点，因此在家用电器、仪器仪表、报警器、寻呼机和电子玩具等领域得到广泛应用。

微型直流讯响器可分为不带音源和自带音源两大类。其中，自带音源的又分为连续长音、断续声音两种。不带音源直流讯响器工作时需要接入音频信号。自带音源直流讯响器则不需要音频信号，接上规定的直流电压即可发声。

讯响器和蜂鸣器的作用是发出保真度要求不高的声音。

(1) 电话振铃电路如图 6-29 所示。HA 为不带音源讯响器。当有来电呼入时，信号源产生的铃音信号经控制电路驱动不带音源讯响器 HA 发出振铃声。不同的信号源可以使讯响器发出不同的振铃声。

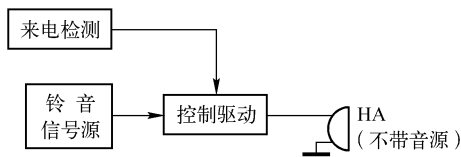


图 6-29 电话振铃电路

(2) 声音提示电路如图 6-30 所示。VT 为驱动开关管。当控制脉冲为“1”时，开关管 VT 导通，自带音源讯响器 HA 发声。当控制脉冲为“0”时，开关管 VT 截止，自带音源讯响器 HA 不发声。

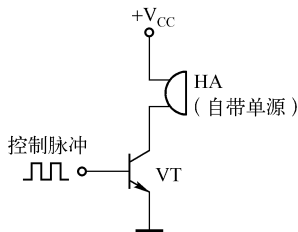


图 6-30 声音提示电路



6.2.5 传声器的作用

传声器又称为话筒，是一种常用的声电转换器件，如图6-31所示。传声器有许多种类，使用较多的是动圈式传声器和驻极体传声器。



图6-31 传声器

传声器的特点和作用是能将声音转换为电信号。

(1) 动圈式传声器是较常用的传声器。其工作原理如图6-32所示。音圈位于永久磁铁的磁隙中，并与音膜粘接在一起，当声波使音膜振动时，带动音圈做切割磁力线运动而产生音频感应电压，这个音频感应电压代表声波的信息，从而实现声电转换。由于传声器音圈的圈数很少，其输出电压和输出阻抗都很低，故为了提高输出电压和便于阻抗匹配，音圈产生的信号经过输出变压器输出。

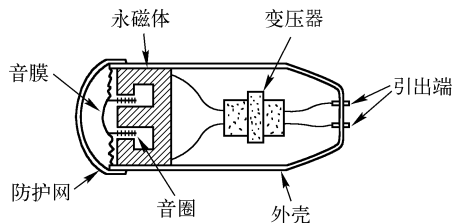


图6-32 动圈式传声器的结构



动圈式传声器应用电路如图 6-33 所示。动圈式传声器具有坚固耐用、价格较低、单向指向性的特点，广泛应用于广播、扩音、录音、文艺演出、卡拉 OK 等领域。

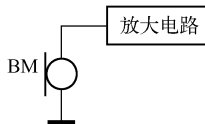


图 6-33 动圈式传声器应用电路

(2) 驻极体传声器属于电容式传声器的一种，其内部包含一个场效应管用于放大，因此拾音灵敏度较高，输出音频信号较大。由于内部有场效应管，因此驻极体传声器必须加上直流电压才能工作。根据内电路的接法不同，驻极体传声器分为三端式（源极输出式）和二端式（漏极输出式）两种，如图 6-34 所示。

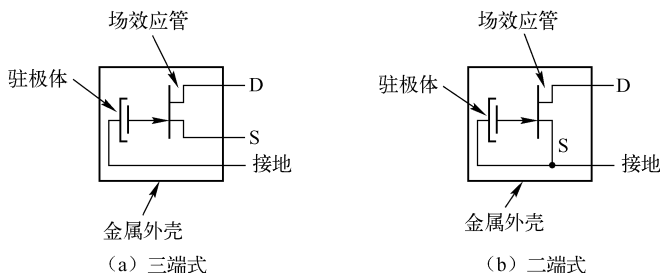


图 6-34 驻极体传声器的结构原理

三端式驻极体传声器的应用电路如图 6-35 所示。漏极 D 接电源正极，输出信号自源极 S 取出并经电容 C 耦合至放大电路，R 是源极 S 的负载电阻。

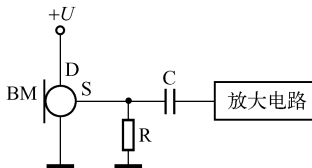


图 6-35 三端式驻极体传声器的应用电路



二端式驻极体传声器的应用电路如图 6-36 所示。漏极 D 经负载电阻 R 接电源正极，输出信号自漏极 D 取出并经电容 C 耦合至放大电路。

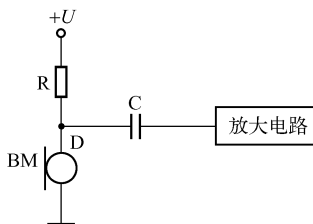





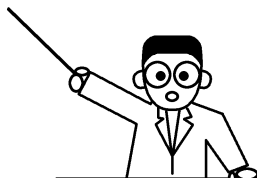
图 6-36 二端式驻极体传声器的应用电路

驻极体传声器具有体积小、质量小、电声性能好、价格低廉的特点，在无线电与电子制作中得到非常广泛的应用。

第 7 章

其他器件的符号及其在 电路图中的作用

-  7.1 控制器件的符号和作用
-  7.2 保护器件的符号和作用
-  7.3 指示器件的符号和作用



看图识电子电路图



除了前面几章讲述的基本元件、半导体管、集成电路、光电器件和电声器件外，电路图中还涉及其他一些电子器件，如控制器件、保护器件和指示器件等。



7.1 控制器件的符号和作用

控制器件是指能够对电路或电子设备进行操作控制的元器件，包括直接控制器件和间接控制器件两类。直接控制器件主要有开关与触点、接插件等。间接控制器件主要有继电器等。



7.1.1 控制器件的符号

控制器件的图形符号和文字符号见表 7-1、表 7-2 和表 7-3。

表 7-1 开关与触点的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
动合（常开）触点， 开关		S	开关的一般符号
动断（常闭）触点			
先断后合的转换触点			
中间断开的双向触点			
先合后断的转换触点			
双动合触点			



续表

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
双动断触点			
延时闭合的动合触点			
延时断开的动合触点			
延时闭合的动断触点			
延时断开的动断触点			
手动开关		S	一般符号
按钮开关		SB	不闭锁
拉拔开关		S	不闭锁
旋钮开关, 旋转开关		S	闭锁
单极 4 位开关		S	位数可增减
有 4 个独立电路的 4 位手动开关		S	



续表

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
3 极联动开关		S	极数可增减
接触器（在非动作位置触点断开）			
自动释放接触器			
接触器（在非动作位置触点闭合）			
断路器			

表 7-2 继电器的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
继电器的线圈		K	一般符号，触点另加
缓慢释放继电器的线圈		K	触点另加
缓慢吸合继电器的线圈		K	触点另加
快速继电器的线圈		K	触点另加
交流继电器的线圈		KA	触点另加





续表

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
机械保持继电器的线圈		KL	触点另加
极化继电器的线圈		KP	触点另加
剩磁继电器的线圈		K	触点另加
热继电器的驱动器件		K	触点另加

表 7-3 接插件的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
插座或插座的一个极		XS	
插头或插头的一个极		XP	
插头和插座		X	
插头和插座		X	
多极插头插座		X	示出 6 个极
两极插塞和插孔		X	左边插塞中： 长极为插塞尖， 短极为插塞体
三极插塞和插孔		X	示出断开的插孔



续表

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
同轴的插头和插座		X	
同轴插接器		X	
端子		X	
可拆卸的端子		X	
端子板		XT	示出线端标记

7.1.2 开关的作用

开关是一种最常用的直接控制器件，如图 7-1 所示。开关的特点是可以直接操作动作，对电路进行控制。



图 7-1 开关

开关的种类繁多，大小各异，按结构可分为拨动开关、钮子



开关、跷板开关、船形开关、推拉开关、旋转开关、按钮开关、微动开关、薄膜开关等；按控制极位可分为单极单位开关、单极多位开关、多极单位开关、多极多位开关等；按接点形式可分为动合开关、动断开关、转换开关等。

开关的主要作用是在各种各类电子电路和电子设备中起着接通、切断、转换等控制作用。

(1) 拨动开关是指通过拨动操作的开关，如钮子开关、直拨开关和直推开关等。图 7-2 为钮子开关结构示意图，图中位置为 b 端与 a 端接通。当将钮子状拨柄拨向左边时，b 端与 a 端断开而与 c 端接通。钮子开关常用作电源开关，如图 7-3 所示收音机电路中的电源开关 S。

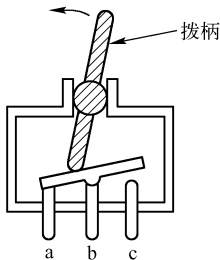


图 7-2 钮子开关结构示意图

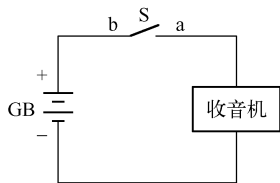


图 7-3 收音机电路中的电源开关 S

(2) 旋转开关是指通过旋转操作的开关。图 7-4 为单层 3 组旋转开关结构示意图。3 组开关的接触片固定在一圆形绝缘物上同步转动，构成 3 极 3 位开关。图 7-5 为其电路符号。旋转开关常用作电路工作状态的切换，如收音机的波段开关、万用表的量程选择开关等。

(3) 按钮开关是一种不闭锁开关，按下按钮时开关从原始状态切换到动作状态，松开按钮后开关自动回复为原始状态。图 7-6 为按钮开关结构，由于动接点具有弹性，平时向上弹起，只有按钮被按下时才使接点闭合。

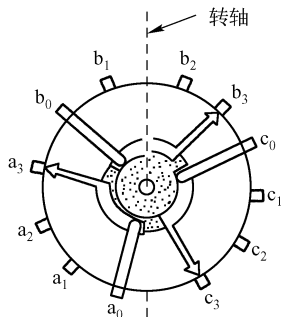


图 7-4 单层 3 组旋转开关结构示意图

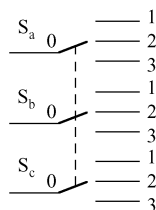


图 7-5 3 极 3 位开关的符号

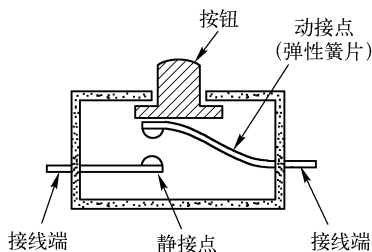


图 7-6 按钮开关结构

按照接点形式不同,按钮开关可分为三类,如图 7-7 所示。常开按钮平时 A 与 B 接点间不通,按下按钮时 A 与 B 接点间接通。常闭按钮平时 A 与 B 接点间接通,按下按钮时 A 与 B 接点间切断。转换按钮平时 B 与 A 接点接通而与 C 接点断开,按下按钮时 B 与 A 接点断开而与 C 接点接通。

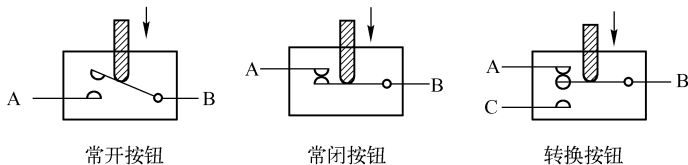


图 7-7 按钮开关的种类



按钮开关主要应用在门铃、家用电器和电气设备的触发控制等方面。

▶▶ 7.1.3 继电器的作用

继电器是一种常用的间接控制器件，在自动控制、遥控、保护电路等方面得到广泛的应用。常用的继电器有直流电磁继电器、交流电磁继电器、干簧继电器、压电继电器、固态继电器、时间继电器、温度继电器等，如图 7-8 所示。

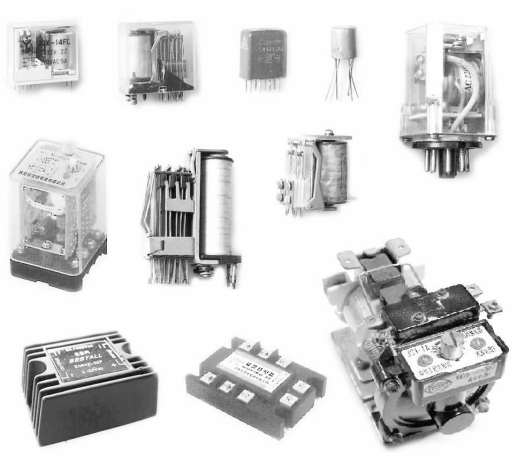


图 7-8 继电器

电磁式继电器是最常用的继电器之一。它是利用电磁吸引力推动接点动作的，由铁心、线圈、衔铁、动接点、静接点等部分组成，如图 7-9 所示。平时，衔铁在弹簧的作用下向上翘起。当工作电流通过线圈时，铁心被磁化，将衔铁吸合。衔铁向下运动时，推动动接点与静接点接通，实现了对被控电路的控制。根据线圈要求工作电压的不同，电磁式继电器分为直流继电器、交流继电器、脉冲继电器等类型。

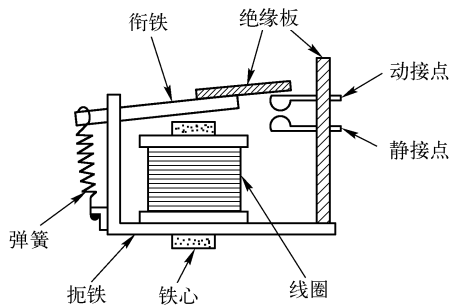


图 7-9 电磁式断路器的结构

继电器的接点多种多样，可分为单组接点继电器和多组接点继电器两大类。单组接点继电器又分为常开接点（动合接点，简称 H 接点）、常闭接点（动断接点，简称 D 接点）、转换接点（简称 Z 接点）三种，如图 7-10 所示。多组接点继电器既可以包括多组相同形式的接点，又可以包括多种不同形式的接点。



常开接点 (H) 常闭接点 (D) 转换接点 (Z)

图 7-10 断路器的接点

干簧式继电器也是最常用的继电器之一，由干簧管和线圈组成。干簧管是将两根互不相通的铁磁性金属条密封在玻璃管内而成，干簧管置于线圈中。干簧式继电器工作原理如图 7-11 所示，当工作电流通过线圈时，线圈产生的磁场使干簧管中的金属条被磁化，两金属条因极性相反而吸合，接通被控电路。在线圈中可以放入若干个干簧管，它们在线圈磁场的作用下同时动作。

固态继电器（简称为 SSR）是一种新型的继电器，采用电子电路实现继电器的功能，依靠光电耦合器实现控制电路与被控电路之间的隔离。固态继电器可分为直流式和交流式两大类。

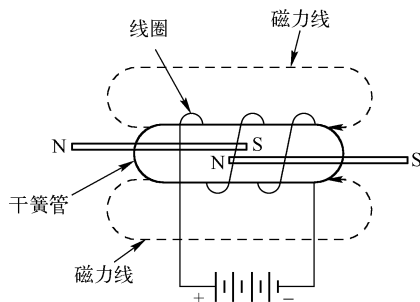


图 7-11 干簧式继电器工作原理

直流式固态继电器电路原理如图 7-12 所示。控制电压由 IN 端输入，通过光电耦合器将控制信号耦合至被控端，经放大后驱动开关管 VT 导通。固态继电器输出端 OUT 接入被控电路回路中，输出端 OUT 有正、负极之分。

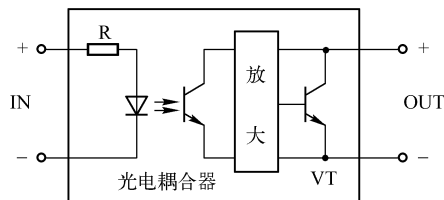


图 7-12 直流式固态继电器电路原理

交流式固态继电器电路原理如图 7-13 所示。与直流式不同的是，开关元件采用双向可控硅 VS，因此交流式固态继电器输出端 OUT 无正、负极之分，可以控制交流回路的通、断。

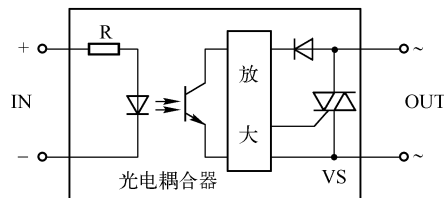


图 7-13 交流式固态继电器电路原理



继电器的特点是可以用电流来控制较大的电流、用低电压来控制高电压、用直流电来控制交流电等，并且可实现控制电路与被控电路之间的完全隔离。继电器的主要作用是间接控制和隔离控制。

(1) 间接控制。图 7-14 为继电器用于声控电灯开关，当话筒 BM 接收到声音信号时，经放大后使继电器 K 吸合，其接点 K_{-1} 接通照明灯的市电电源使其点亮，实现用弱电间接控制强电的目的。

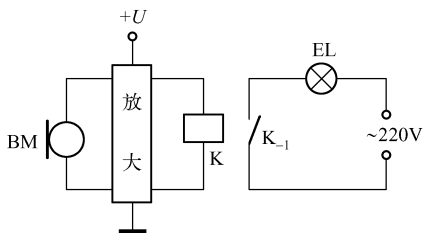


图 7-14 继电器用于声控电灯开关

(2) 隔离控制。图 7-15 为继电器用于扬声器保护电路，功放输出端 (L 或 R 端) 如果出现直流电压，则被扬声器保护电路检测放大后，使继电器 K 吸合，其接点 K_{-1} 和 K_{-2} (均为常闭接点) 断开，切断了功放输出端与扬声器的连接，保护了扬声器免于被烧毁。采用继电器控制扬声器的通、断，使保护电路与音频电路完全隔离，确保了高保真的音质。

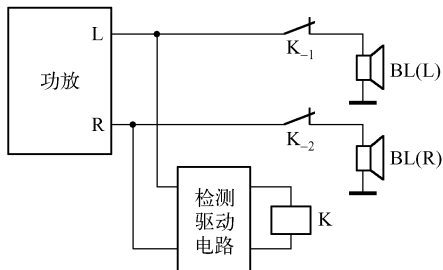


图 7-15 继电器用于扬声器保护电路







7.2 保护器件的符号和作用

保护器件是指能够对电路或电子设备进行保护的元器件，常用的保护器件主要有熔断器、避雷器等。

7.2.1 保护器件的符号

保护器件的图形符号和文字符号见表 7-4。

表 7-4 保护器件的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
熔断器		FU	一般符号
火花间隙		F	
避雷器		F	
保护用充气放电管		F	

7.2.2 熔断器的作用

熔断器是最常用的保护器件，包括各种熔丝熔断器、热熔断器、可恢复保险丝和熔断电阻等，如图 7-16 所示。熔断器的特点是当电流过大时能够迅速熔断，从而起到对用电设备或电路的短路和过载进行保护的作用。

熔断器应串接在被保护的电路中，并应接在电源相线输入端，如图 7-17 所示。熔断器中的熔丝是由金属或合金材料制成的，在电路或电器设备工作正常时，熔丝相当于一截导线，对电



图 7-16 熔断器

路无影响。当电路或电器设备发生短路或过载时，流过熔丝的电流骤增，超过熔丝的额定电流，致使熔丝急剧发热而熔断，切断了电源，从而达到保护电路和电器设备、防止故障扩大的目的。

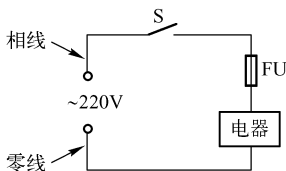


图 7-17 熔断器的应用

一般熔丝的保护作用是一次性的，一旦熔断即失去作用，应在排除故障后更换新的相同规格的熔丝。

(1) 玻璃管熔断器。玻璃管熔断器由玻璃熔丝管和金属固定架组成。玻璃熔丝管的两端固定有金属帽，熔丝置于玻璃管中并与两端的金属帽相连，如图 7-18 所示。玻璃熔丝管的额定电流从 0.1 ~ 10A 具有很多规格，尺寸也有 18mm、20mm、22mm 等不同长度。

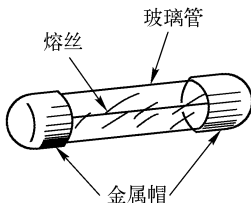


图 7-18 玻璃管熔断器



金属固定架固定在电路板上并接入电路，同时也是玻璃熔丝管两端的电气连接点，如图 7-19 所示，使用与更换时熔丝管可以很快地卡上或取下，透过玻璃管可以用肉眼直接观察到熔丝熔断与否，因此使用很方便。玻璃管熔断器主要应用在电子设备和小型电器中。

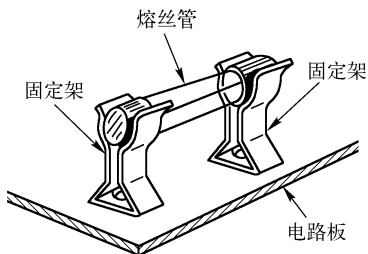


图 7-19 玻璃管熔断器的结构

(2) 热熔断器。热熔断器受环境温度的控制而动作，是一种一次性的过热保护器件。其典型结构如图 7-20 所示。热熔断器外壳内连接两端引线的感温导电体由具有固定熔点的低熔点合金制成，在正常情况下（未熔断时）热熔断器的电阻值为零。

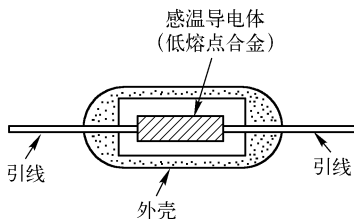


图 7-20 热熔断器的结构

当热熔断器所处环境温度达到其额定动作温度时，感温导电体快速熔断切断电路。热熔断器具有多种不同的额定动作温度，广泛应用在各种家用电器、照明灯具、工业电器设备和电动工具，特别是电热类电器产品中。

(3) 可恢复保险丝。一般的保险丝熔断后即失去使用价值，



必须更换新的。可恢复保险丝可以重复使用，它实际上是一种限流型保护器件，外形如图 7-21 所示。可恢复保险丝由正温度系数的 PTC 高分子材料制成，使用时串联在被保护电路中，如图 7-22 所示。

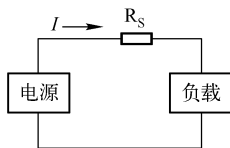
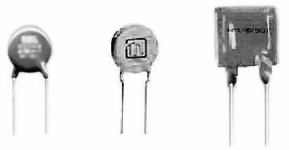


图 7-21 可恢复保险丝外形 图 7-22 可恢复保险丝的应用

可恢复保险丝在常温下的阻值极小，对电路无影响。当负载电路出现过流或短路故障时，由于通过可恢复保险丝 R_s 的电流骤增，导致其迅速进入高阻状态，切断电路中的电流，保护负载不致损坏。直至故障消失，可恢复保险丝 R_s 冷却后又自动恢复为微阻导通状态，电路恢复正常工作。图 7-23 为可恢复保险丝的阻值 - 温度曲线。

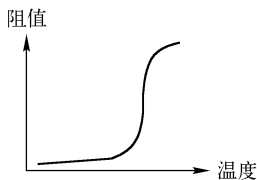


图 7-23 可恢复保险丝的阻值 - 温度曲线

(4) 熔断电阻。熔断电阻又称保险电阻，是一种兼有电阻和保险丝双重功能的特殊元件。熔断电阻的文字符号为“RF”，图形符号如图 7-24 所示。熔断电阻也分为一次性熔断电阻和可恢复熔断电阻两大类。

熔断电阻的阻值一般较小，主要功能还是保险。使用熔断电阻可以只用一个元件就能同时起到限流和保险作用。图 7-25



图 7-24 熔断电阻的图形符号



为大功率驱动管应用熔断电阻的例子，正常时熔断电阻 R_F 起着限流电阻的作用，一旦负载电路过载或短路， R_F 即熔断，起到保护作用。

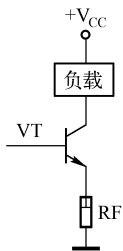


图 7-25 熔断电阻的应用



7.3 指示器件的符号和作用

指示器件是指能够对电路或电子设备运行情况进行指示的元器件，常用的指示器件主要有信号器件、测量仪表等。

7.3.1 指示器件的符号

指示器件的图形符号和文字符号见表 7-5 和表 7-6。

表 7-5 信号器件的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
钟		PT	一般符号
母钟		PT	
带有开关的钟		PT	
灯，信号灯		HL	一般符号



续表

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
闪光型信号灯		HL	
电喇叭		HA	
电铃		HA	
电警笛, 报警器		HA	
蜂鸣器		HA	

表 7-6 测量仪表的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
电压表		PV	
电流表		PA	
功率表		P	
相位表		P	
频率表		P	
波长表		P	
示波器		P	
检流计		P	
温度计		P	
转速表		P	





续表

名 称	图 形 符 号	文 字 符 号	说 明
电度表（瓦特小时计）		PJ	
热电偶		B	示出正极
带有隔离加热元件的热电偶		B	

7.3.2 信号器件的作用

信号器件是指能够发出声、光信号的电子器件，如指示灯、信号灯、蜂鸣器、电警笛等。信号器件的主要作用是指示电路或设备的工作状态。

图 7-26 为电源指示电路，指示灯 HL 亮表示电源已接通，指示灯 HL 不亮表示电源已关断。

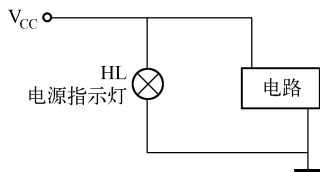


图 7-26 电源指示电路

图 7-27 为报警电路，当电路出现故障时，电警笛 HA 响，发出警示信号。

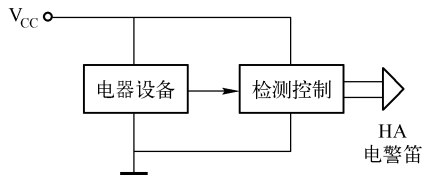


图 7-27 报警电路



7.3.3 测量仪表的作用

测量仪表是指能够测量并指示电路中电压、电流、功率等重要物理量的电子仪表，如电压表、电流表、功率表、电度表等。测量仪表的主要作用是反映电路的工作状态，人们根据测量仪表的指示即可判断电路工作是否正常。

图 7-28 为电压测量电路，电压表 PV 指示电路的电压高低。

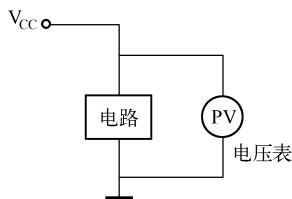


图 7-28 电压测量电路

图 7-29 为电流测量电路，电流表 PA 指示电路的电流大小。

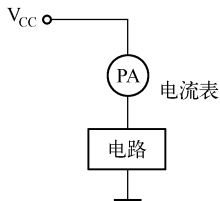


图 7-29 电流测量电路

图 7-30 为电功率测量电路，功率表 P 指示电路的电功率大小。

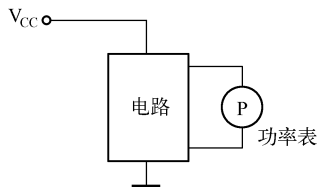


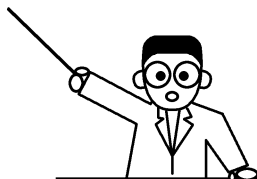


图 7-30 电功率测量电路

第 8 章

掌握特点——巧看集成 电路图

-  8.1 集成电路的基本看图方法与技巧
-  8.2 数字电路的基本看图方法与技巧



看图识电子电路图



随着微电子技术的不断发展,各种无线电和电子设备越来越多地使用集成电路。集成电路符号也就越来越多地出现在各种电路图中。本章重点介绍含有集成电路的电路图的看图方法与技巧。



8.1 集成电路的基本看图方法与技巧

由于电路图中一般不画出集成电路的内部电路,使得应用集成电路构成的电路图不像分立元件电路图那样直观易读,因此,看懂含有集成电路电路图需要掌握一些特殊的看图方法。



8.1.1 了解集成电路的基本功能

集成电路往往都是电路图中各单元电路的核心,在单元电路中起着主要的作用。从图面上看,某些单元电路就是由一块或几块集成电路再配以必需的外围元器件构成的。要看懂这样的电路图,关键是了解和掌握处于核心地位的集成电路的基本功能,以此为突破口分析整个电路的工作原理。

集成电路的品种繁多,功能各异,特别是对于缺少资料和经验的无线电和电子爱好者来说,掌握电路图中集成电路的功能并非易事。但是,可以通过了解电路的作用、查找资料、分析接口情况等方法,来搞清楚集成电路的基本功能。

(1) 根据单元电路的作用判断集成电路的功能

集成电路往往是单元电路的核心,单元电路的作用主要是依靠该集成电路来实现和完成的。所以,根据单元电路所承担的任务和所起的作用,可以大致判断出在单元电路中起核心作用的集成电路的基本功能。

例如,图8-1为以集成电路 IC_1 为核心构成的电路。它是如图8-2所示扩音机电路原理方框图中的一个单元。该单元电路的作用和任务是对音频信号进行功率放大,因此,作为核心器件的集成电路 IC_1 的基本功能是功率放大, IC_1 应该是一个集成功率放大器。

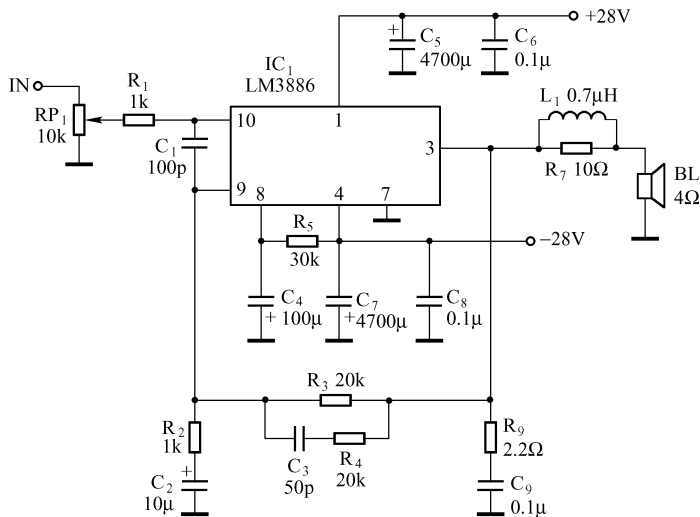


图 8-1 功率放大器

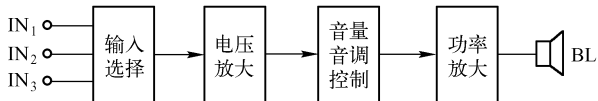


图 8-2 扩音机电路原理方框图

(2) 通过查找资料了解集成电路功能

通常在较完整的电路图中，均会标注有各个集成电路的型号。可以根据电路图提供的型号，通过查阅集成电路手册等技术资料，搞清楚这些集成电路的基本功能及其他相关数据。这对于看懂集成电路电路图将会有极大的帮助。

在如图 8-1 所示功率放大电路中，集成电路 IC₁ 的型号为 LM3886，通过查阅手册可以很清楚地了解到：LM3886 是高性能集成功率放大器，频率响应范围为 5Hz ~ 100kHz，输出功率为 50W，总谐波失真为 0.03%，具有过压、过载、超温保护功能和静噪功能，以 LM3886 为核心构成的音频功放单元电路具有很



好的技术性能。

(3) 依据前后接口情况分析集成电路功能

由于新型集成电路层出不穷，而看电路图者所能接触到的技术资料有限，会给查找集成电路资料造成困难。在无法通过查阅资料了解集成电路的情况下，还可以通过分析集成电路与其前级电路的接口关系，以及与其后续电路的接口关系，来确定该集成电路的基本功能。

仍以如图8-1所示功率放大电路为例。集成电路 IC_1 的前级电路是音量控制电路，输入电压信号经音量电位器 RP_1 后到达 IC_1 。集成电路 IC_1 后面连接的是扬声器 BL 。通过分析可知，音量电位器 RP_1 输出的电压信号不足以推动扬声器 BL 发声，在它们之间必须有一个功率放大器，所以，处于音量电位器 RP_1 与扬声器 BL 之间的集成电路 IC_1 的基本功能应该是功率放大。

8.1.2 识别集成电路的引脚

一个集成电路内部通常集成一个甚至多个单元电路，通过若干引脚与外界电路相连接。在电路图中，集成电路仅以一个矩形或三角形图框表示，往往缺乏内部细节，在这种情况下，看懂电路图的关键是正确识别集成电路的各个引脚及其功能。

(1) 集成电路引脚的作用

集成电路引脚的主要作用是建立集成电路内部电路与外围电路的连接点，只有按要求在引脚上连接上外接的元器件或电路，集成电路才能正常工作。这里包括三种情况：一是引脚上外接的元器件是集成电路内部电路的有机组成部分，只有在外接元器件的配合下，集成电路才能构成一个完整的电路；二是通过引脚为集成电路提供工作电源；三是通过引脚为集成电路提供输入信号，并引出集成电路处理后的输出信号。

所以，识别和掌握集成电路各引脚的作用和功能，是看懂和分析含有集成电路电路图的有效方法。

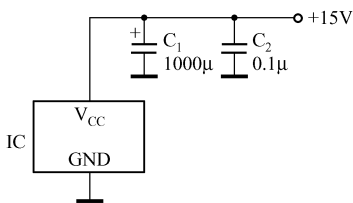
各种集成电路由于功能不同，决定了它们的引脚也不尽相



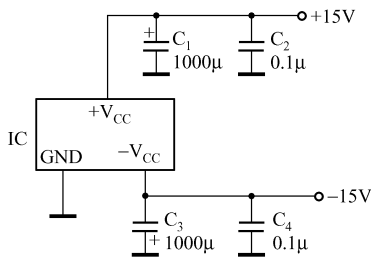
同，但是电源引脚、接地引脚、信号输入和输出引脚则是大多数集成电路所必需的。

(2) 电源引脚

电源引脚的作用是为集成电路引入直流工作电压。集成电路有单电源供电和双电源供电两种类型。单电源供电一般是采用单一的正直流电压作为工作电压。集成电路具有一个电源引脚，电路图中有时在电源引脚旁标注有“ V_{CC} ”字符，如图 8-3 (a) 所示。双电源供电一般是采用对称的正、负直流电压作为工作电压，集成电路具有两个电源引脚，电路图中有时分别在正、负电源引脚旁标注有“ $+V_{CC}$ ”和“ $-V_{SS}$ ”字符，如图 8-3 (b) 所示。



(a) 单电源供电电路



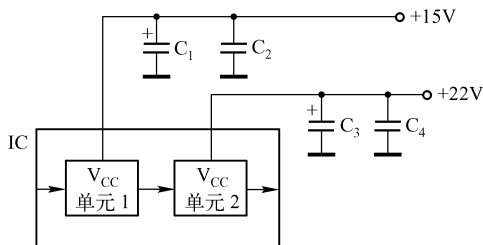
(b) 双电源供电电路

图 8-3 集成电路的电源引脚

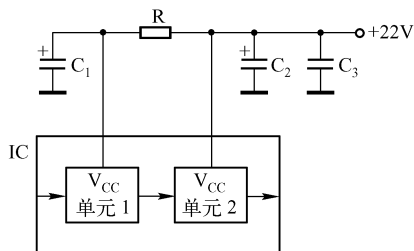
电源引脚的外电路具有明显的特征。一是电源引脚直接与相应电源电路的输出端相连接。二是电源引脚与地之间一般都接有大容量的电源滤波电容，如在如图 8-3 所示中的 C_1 、 C_3 。有的电路还在大容量滤波电容旁并接一个小容量的高频滤波电容，如在如图 8-3 所示中的 C_2 、 C_4 。

集成电路也可能具有更多的电源引脚，主要是以下两种情况。

一是有些集成电路内部的前、后级单元电路分别有自己独立的电源引脚，以便分别供电或接入电源退耦电路，如图 8-4 所示。



(a) 前后级分别供电



(b) 前后级电源之间接有退耦电路

图 8-4 集成电路的多电源引脚

二是有些集成电路内部包含有电子滤波稳压电路，可以输出稳定的直流电压为其他单元电路供电，因此该集成电路另外具有一个电源输出引脚，如图 8-5 所示。

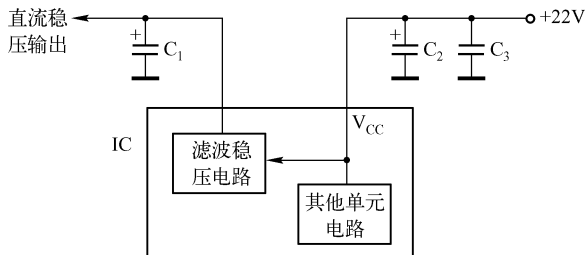


图 8-5 具有电源输出引脚的集成电路

电源稳压集成电路没有专门的电源引脚。这是因为电源稳压集成电路是串接在电源电路中工作的，直流电压从稳压集成电路



的输入端输入，经内部电路稳压后从输出端输出，如图 8-6 所示。

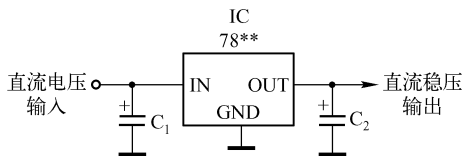


图 8-6 集成稳压器的引脚

(3) 接地引脚

接地引脚的作用是将集成电路内部的地线与外电路的地线连通。集成电路一般具有一个接地引脚，电路图中有时在接地引脚旁标注有“GND”字符，如图 8-3 所示。

接地引脚外电路的明显特征是直接与电路图中的地线相连接，或者直接绘有接地符号。

在电路图中，有些集成电路可能有多个接地引脚，主要有两种情况。

一是有些集成电路内部的前、后级单元电路分别有自己独立的接地引脚，如图 8-7 所示。

二是将集成电路内部闲置不用的单元电路的信号引脚接地，以保证整个集成电路工作的稳定性，如图 8-8 所示。这样接地的引脚并不是真正的接地引脚，但在分析电路图时可以不作严格区分。

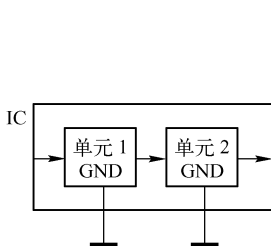


图 8-7 集成电路的多接地引脚

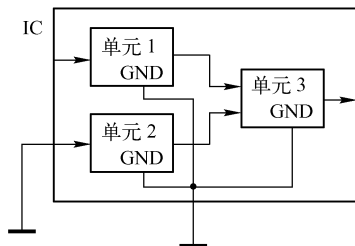


图 8-8 多余输入端接地

(4) 信号输入引脚

信号输入引脚的作用是将输入信号引入集成电路。除了信号



源类集成电路外，一般集成电路至少具有一个信号输入引脚，电路图中有时在信号输入引脚旁标注有“IN”字符，如图8-9（a）所示。有些集成电路同时具有同相输入和反相输入两个信号输入引脚，则在电路图中同相输入引脚旁标注有“+”字符，反相输入引脚旁标注有“-”字符，如图8-9（b）所示。

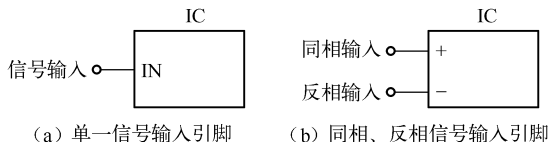


图8-9 集成电路的输入引脚

集成电路信号输入引脚的外电路特征是：通过一个耦合元件与前级电路的输出端相连接。这个耦合元件可以是耦合电容 C ，或者是耦合电阻 R ，或者是 RC 耦合电路，或者是耦合变压器 T 等，如图8-10所示。

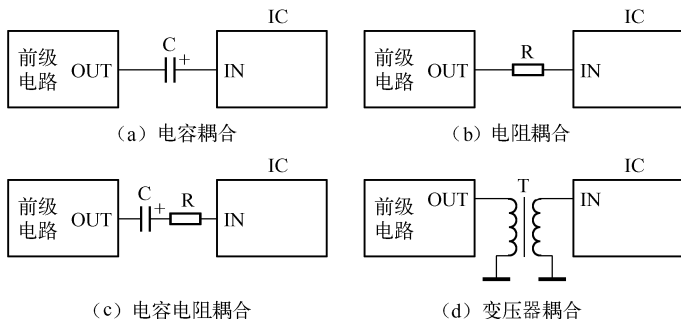


图8-10 输入引脚的外电路特征

有些集成电路具有较多的信号输入引脚，可以分为三种情况。

一是集成电路内部的前、后级单元电路分别有自己独立的信号输入引脚，如图8-11（a）所示。



二是集成电路具有混合处理多个输入信号的功能，所以具有多个信号输入引脚，如图 8-11 (b) 所示。

三是集成电路内部包含有两个（或更多）互相独立的单元电路，如双声道功放集成电路，每一声道都有自己的信号输入引脚，如图 8-11 (c) 所示。

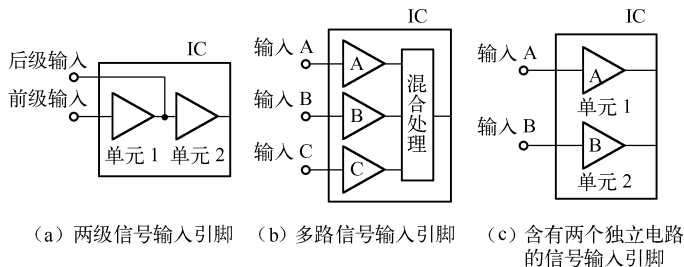


图 8-11 多输入引脚的情况

振荡器、函数发生器等信号源类集成电路一般没有信号输入引脚。

(5) 信号输出引脚

信号输出引脚的作用是将集成电路的输出信号引出。集成电路至少具有一个信号输出引脚，电路图中有时在信号输出引脚旁标注有“OUT”字符，如图 8-12 所示。

集成电路信号输出引脚的外电路特征是：通过电容、电阻、变压器等耦合元件与后续电路的输入端相连接，如图 8-13

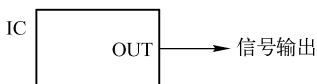
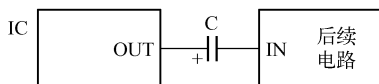
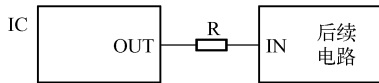


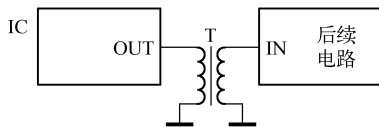
图 8-12 集成电路的输出引脚



(a) 电容耦合



(b) 电阻耦合



(c) 变压器耦合

图 8-13 输出端与后续电路的连接



所示；或者直接驱动扬声器、发光二极管、指示表头等负载，如图8-14所示。

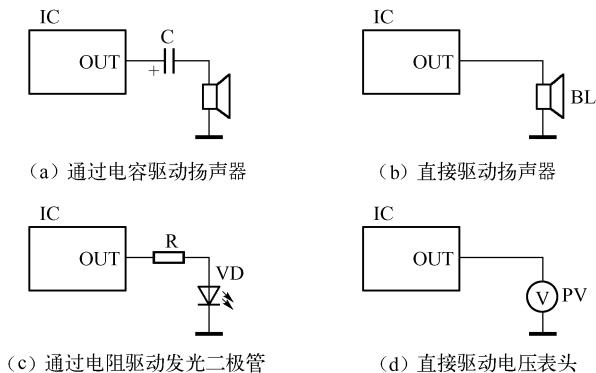


图 8-14 输出端与负载的连接

有些集成电路具有较多的信号输出引脚，有三种情况。

一是集成电路内部的前、后级单元电路分别有自己独立的信号输出引脚，如图8-15（a）所示。

二是集成电路具有多路输出功能，所以具有多个信号输出引

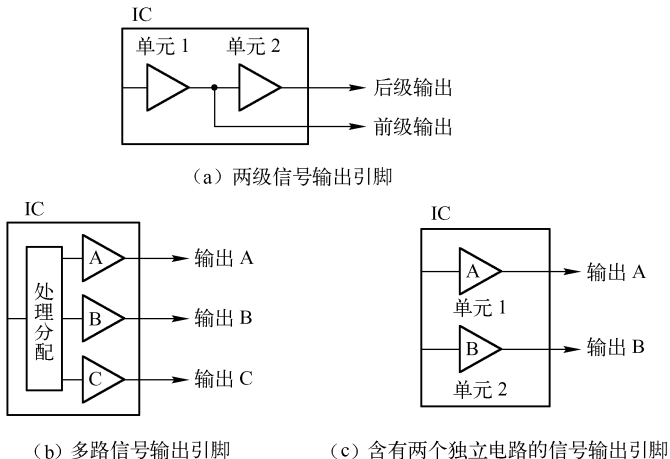


图 8-15 多输出引脚的情况



脚，如图 8-15 (b) 所示。

三是集成电路内部包含有两个（或更多）互相独立的单元电路，如双声道功放集成电路，每一声道都有自己的信号输出引脚，如图 8-15 (c) 所示。

(6) 其他引脚

除了上述 4 种基本引脚之外，有些集成电路还具有一些其他引脚，如外接电阻、电容、电感、晶体等元器件的引脚，自举、消振、负反馈、退耦等保证工作的引脚，静噪、控制等附加功能的引脚等。

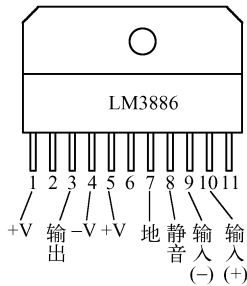


图 8-16 LM3886 的引脚

例如，在如图 8-1 所示功率放大电路中，集成电路 IC₁ 型号为 LM3886，单列直插式封装，共有 11 个引脚，其中 3 个为空脚，两个同为正电源引脚，如图 8-16 所示。在如图 8-1 所示电路图中，画出了 LM3886 实际使用的 7 个引脚：1 脚为正电源引脚，4 脚为负电源引脚，7 脚为接地引脚，10 脚为同相输入引脚，9 脚为反相输入引脚，3 脚为输出引脚，8 脚为静音引脚。

8.1.3 从集成电路的输入/输出关系上分析

在电路图中，集成电路仅以一个矩形或三角形图框表示，一般不画出内部电路，这给分析电路图带来一定难度。在缺乏集成电路内部电路资料的情况下，如何看懂电路图呢？可以通过分析集成电路输入信号与输出信号的关系看懂整个电路图。

集成电路输出信号与输入信号之间的关系主要有幅度变化关系、频率变化关系、阻抗变化关系、相位变化关系和波形变化关系等。

(1) 幅度变化关系

集成电路的输出信号与输入信号相比，其幅度发生了变化而



其他参数不变,如图8-17所示。

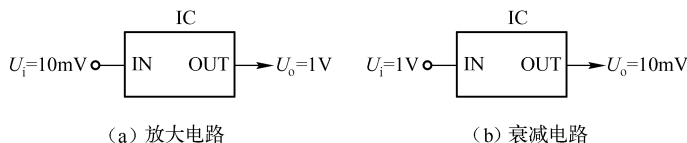


图8-17 幅度变化关系

如果输出信号的幅度大于输入信号,就可以判定这个集成电路是一个放大电路,如电压放大器、中频放大器、前置放大器、功率放大器等。如果输出信号的幅度小于输入信号,则该集成电路是一个衰减电路,如衰减器、分压器等。

(2) 频率变化关系

集成电路的输出信号与输入信号相比,其频率发生了变化,如图8-18所示。

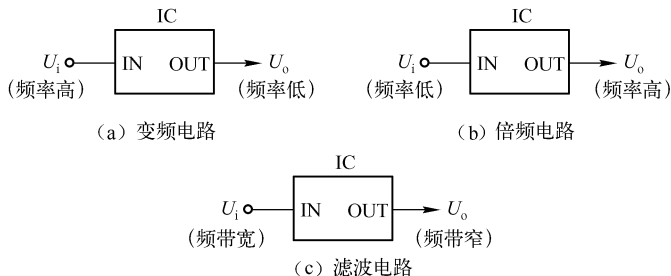


图8-18 频率变化关系

如果输出信号的频率低于输入信号,则该集成电路是一个变频电路。如果输出信号的频率高于输入信号,则该集成电路是一个倍频电路。如果输出信号的频带是输入信号的一部分,则该集成电路是一个滤波电路。

(3) 阻抗变化关系

集成电路的输出信号与输入信号相比,其阻抗发生了变化,则该集成电路是一个阻抗变换电路,如图8-19所示。

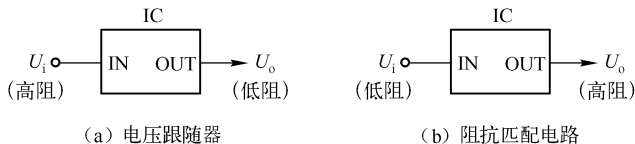


图 8-19 阻抗变化关系

如果输出信号的阻抗低于输入信号，则该集成电路是电压跟随器、缓冲器等。如果输出信号的阻抗高于输入信号，则该集成电路是阻抗匹配电路、恒流输出电路等。

(4) 相位变化关系

集成电路的输出信号与输入信号相比，其相位发生了变化，则该集成电路是一个移相电路，如图 8-20 所示。如果移相角度为 180° ，则可以称为反相电路。

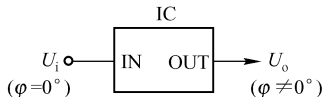


图 8-20 相位变化关系

(5) 波形变化关系

集成电路的输出信号与输入信号相比，其波形发生了变化，则该集成电路是一个整形电路，如图 8-21 所示。图 8-21 (a) 为输出信号幅度受到限制的限幅电路。图 8-21 (b) 为波形边沿变得陡峭的施密特触发器电路。图 8-21 (c) 为强调输入信号变化率的微分电路。图 8-21 (d) 为强调输入信号随时间积累情况的积分电路。

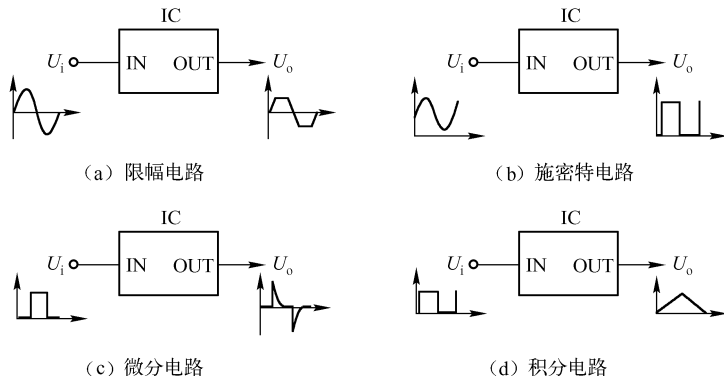


图 8-21 波形变化关系



除此之外,还有诸如调制关系、解调关系、逻辑关系、控制关系等。有些集成电路的输入/输出信号之间可能同时包含数种上述基本关系,甚至具有更复杂的输入/输出关系。因此,熟练掌握这些基本关系,有助于融会贯通、举一反三地分析各种集成电路电路图。

► 8.1.4 从集成电路的接口关系上分析

电路图中往往会包含有若干个集成电路,它们之间通过一定的电路组成一个有机的整体。分析各个集成电路之间及集成电路与其他分立元件单元电路之间的接口关系,也是看懂集成电路电路图的有效方法。

(1) 从集成电路与其他集成电路的接口关系上分析

在电路图中,已知一些集成电路的功能与作用,就可以从各集成电路之间的接口关系上,分析出未知集成电路在电路图中的作用。

例如,在如图8-22所示电路图中, IC_1 为一个未知集成电路,在两个输入端中,“ IN_1 ”与高放集成电路的输出端相接,输入高频信号;“ IN_2 ”与本振集成电路的输出端相接,输入本振信号。 IC_1 的输出端“OUT”与中放集成电路的中频信号输入端相接。因此,通过分析可以得知, IC_1 为混频集成电路,电台信号经高放级放大后输入 IC_1 ,同时本振级产生的本振信号也输入 IC_1 ,由 IC_1 混频后输出中频信号至中放级。

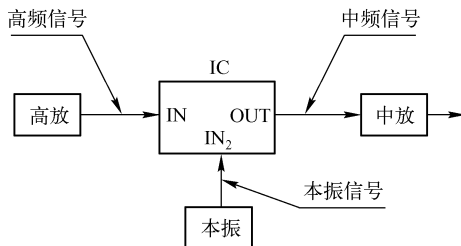


图8-22 混频电路



(2) 从集成电路与分立元件单元电路的接口关系上分析

由于分立元件单元电路比较直观、容易看懂，因此通过对集成电路与分立元件单元电路接口关系的分析，可以帮助我们掌握该集成电路在电路图中的作用。

例如，在如图 8-23 所示电路图中，集成电路 IC_2 通过变压器 T_3 与分立元件电路相连接。该分立元件单元电路是一个典型的检波电路， VD_2 为检波二极管， C_{11} 、 R_{10} 、 C_{12} 组成 π 形滤波网络， RP_1 为音量电位器， T_3 为中频变压器。 IC_2 的输出信号由 T_3 耦合至检波电路进行检波。因此， IC_2 是中频放大器集成电路，在整个电路中承担中频放大的任务。

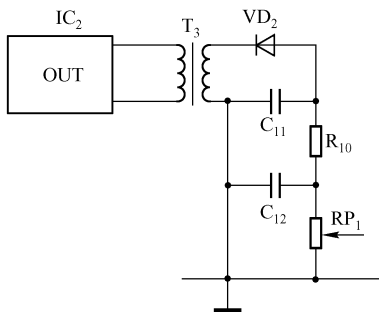


图 8-23 中频放大与检波电路



8.2 数字电路的基本看图方法与技巧

数字电路处理的是不连续的、离散的数字信号。数字信号一般只具有“0”和“1”两个状态。这与传统的模拟电路完全不同。对于数字电路或含有数字电路的电路图，看懂它的关键是，通过分析各种输入信号状态与输出信号状态之间的逻辑关系，搞清楚电路的逻辑功能。



8.2.1 掌握数字电路的引脚特征

数字集成电路在电路图中通常以分散画法的形式出现，即一



块集成电路中的若干个功能单元，以逻辑符号的图形分布在电路图中的不同位置上。这是数字电路与模拟电路在电路图表现形式上的显著区别。

分析数字电路，一般只需要掌握逻辑单元的功能，而不必去研究逻辑单元内部的电路。因此，熟识数字逻辑单元的符号和数字集成电路引脚的特征，能够帮助我们正确看懂数字电路图。

(1) 数字集成电路引脚的作用

数字集成电路引脚的主要作用是建立集成电路内部电路与外围电路的连接点，只有通过引脚与外围电路建立联系，数字电路才能发挥其功能，包括三方面的情况：一是通过引脚使数字电路之间、数字电路与其他电路之间建立有机的逻辑关系；二是通过引脚为数字集成电路提供工作电源；三是通过引脚为数字电路提供输入信号，并引出数字电路处理后的输出信号。

所以，识别和掌握数字集成电路各引脚的作用和功能，是看懂和分析含有数字集成电路电路图的有效方法。

各种数字集成电路功能不同，决定了它们的引脚也不尽相同，但是电源引脚、接地引脚、输入端和输出端引脚则是大多数数字集成电路所必有的。

(2) 电源引脚

电源引脚的作用是为数字集成电路引入直流工作电压。数字集成电路一般采用单电源供电，即采用单一的正直流电压作为工作电压。数字集成电路具有一个电源引脚，电路图中有时在电源引脚旁标注有“ V_{DD} ”字符，如图8-24所示。

电源引脚的外电路具有明显的特征。一是电源引脚直接与相应的电源电路的输出端相连接。二是电源引脚与地之间一般都接有大容量的电源滤波电容，如图8-24所示中的 C_1 。

电路图中有些数字集成电路可能有多个引脚接电源，这些引脚中有些并非才是真正的电源引脚，而是逻辑功能的需要，主要有以下三种情况：

一是有些数字集成电路内部包含有若干个互相独立的门电路



或触发器，对于其中多余不用的门电路或触发器，往往将它们的输入端接正电源，如图 8-25 所示。

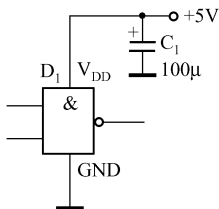


图 8-24 数字电路的电源引脚

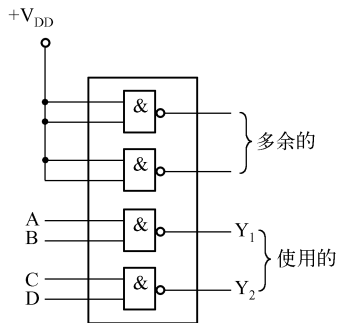


图 8-25 多余的输入端接电源

二是与门、与非门多余不用的输入端，应接正电源以保证其逻辑功能正常，如图 8-26 所示。

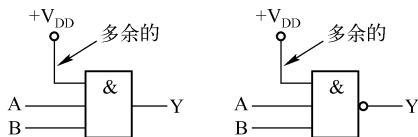


图 8-26 与门、与非门多余输入端的处理

三是触发器、计数器、译码器、寄存器等数字电路中，不使用的“0”电平有效的控制端，应接正电源以保证其逻辑功能正常，如图 8-27 所示。

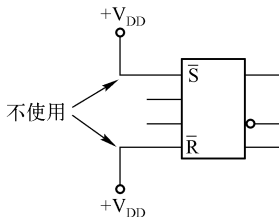


图 8-27 多余“0”电平有效控制端的处理



(3) 接地引脚

接地引脚的作用是将数字集成电路内部的地线与外电路的地线连通。数字集成电路一般具有一个接地引脚，电路图中有时在接地引脚旁标注有“GND”字符，如图8-24所示。

接地引脚外电路的明显特征是直接与电路图中的地线相连接，或者直接绘有接地符号。

电路图中有些集成电路可能有多个引脚接地，主要有以下3种情况。

一是有些数字集成电路内部包含有若干个互相独立的门电路或触发器，对于其中多余不用的门电路或触发器，往往将它们的输入端接地，如图8-28所示。

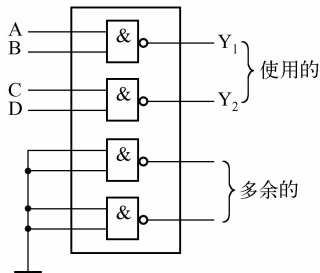


图8-28 多余输入端接地

二是或门、或非门多余不用的输入端，应接地以保证其逻辑功能正常，如图8-29所示。

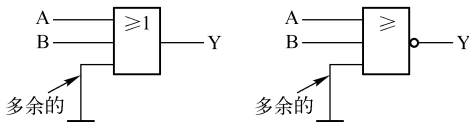


图8-29 或门、或非门多余输入端的处理

三是触发器、计数器、译码器、寄存器等数字电路，不使用的“1”电平有效的控制端，应接地以保证其逻辑功能正常，如图8-30所示。

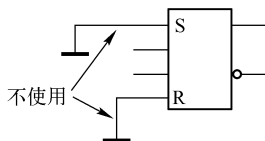


图 8-30 多余“1”电平有效控制端的处理

(4) 输入端引脚

数字电路输入端包括数据输入端和控制输入端两大类。这些输入端从引脚图形上可分为一般输入端、反相输入端、边沿触发输入端、反相边沿触发输入端等，如图 8-31 所示。

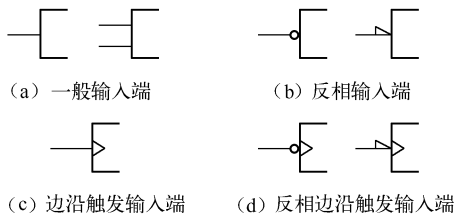


图 8-31 输入端的类型

一般数据输入端，数据信号以原码形态输入。例如，门电路的输入端，有时标注有字符“A、B、C、……”，如图 8-32 所示。触发器的数据输入端，标注有字符“D、J、K、……”等，如图 8-33 所示。移位寄存器的数据输入端中，串行数据输入端标注有“D”字符，并行数据输入端标注有“P₁、P₂、P₃、P₄、……”字符，如图 8-34 所示。

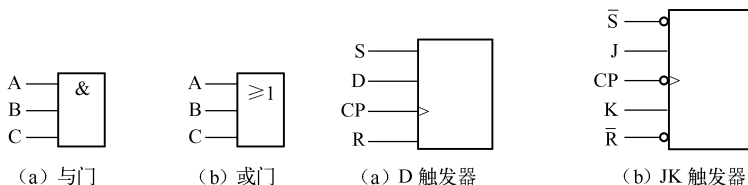


图 8-32 门电路的输入端

图 8-33 触发器的输入端



一般控制输入端，控制信号为“1”时起作用。例如，图8-33 (a) 为D触发器的“R”（置“0”端）和“S”（置“1”端）两个控制输入端。当 $R=1$ 时，触发器被置“0”；当 $S=1$ 时，触发器被置“1”；当 $R=0$ 或 $S=0$ 时，对触发器不起任何控制作用。

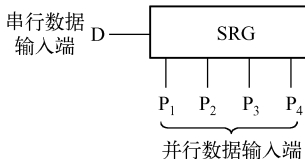


图8-34 移位寄存器的输入端

反相数据输入端，数据信号以反码形态输入。例如，图8-35 (a)为具有反相数据输入端的门电路，反相输入端的标注字符上方有一短杠“-”表示反相，如“ \bar{A} 、 \bar{B} 、……”。反相数据输入端的效果相当于将输入信号反相后再输入。图8-35 (b) 为其等效电路。图8-36 为移位寄存器反相数据输入端，“ \bar{D} ”为反相串行数据输入端。

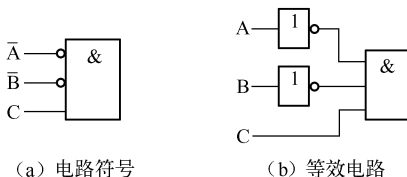


图8-35 反相输入端及其等效电路

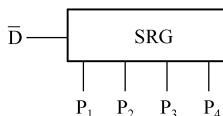


图8-36 移位寄存器的反相数据输入端

反相控制输入端，控制信号为“0”时起作用。例如，图8-33 (b) 为JK触发器的“ \bar{R} ”（置“0”端）和“ \bar{S} ”（置“1”端）两个控制输入端，当 $\bar{R}=0$ 时，触发器被置“0”；当 $\bar{S}=0$ 时，触发器被置“1”；当 $\bar{R}=1$ 或 $\bar{S}=1$ 时，对触发器不起任何控制作用。

一般边沿触发输入端，触发脉冲的上升沿起作用。边沿触发输入端常见于各类触发器的触发端，以及各种时序电路的时钟脉冲输入端。例如，图8-37 为单稳态触发器的正触发端 TR_+ ，当触发脉冲的上升沿作用于 TR_+ 端时，单稳态触发器被触发翻转



为暂稳态。在如图 8-33 (a) 所示的 D 触发器中, 时钟脉冲输入端 CP 是边沿触发输入端, D 触发器在时钟脉冲上升沿的触发下动作。

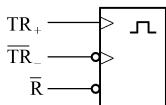


图 8-37 单稳态触发器的输入端

反相边沿触发输入端, 触发脉冲的下降沿起作用。反相边沿触发相当于在边沿触发输入端前加入了一个反相器。例如, 图 8-37 为单稳态触发器的负触发端 $\overline{\text{TR}}_-$, 当触发脉冲的下

降沿作用于 $\overline{\text{TR}}_-$ 端时, 单稳态触发器被触发翻转为暂稳态。在如图 8-33 (b) 所示的 JK 触发器中, 时钟脉冲输入端 CP 是反相边沿触发输入端, JK 触发器在时钟脉冲下降沿的触发下动作。

其他输入端。在数字电路系统中, 有时也会处理或传输模拟信号, 因此, 必要时在电路图中相关的输入端旁加注字符, 如图 8-38 所示。“ \cap ”表示模拟信号输入端, “#”表示数字信号输入端。例如, 在如图 8-39 所示模拟开关的输入端中, 信号端标注有“ \cap ”, 表示这是模拟信号输入端; 控制端注有“#”, 表示这是数字信号输入端, 模拟信号在数字信号的控制下接通或断开。



(a) 模拟信号输入端



(b) 数字信号输入端

图 8-38 模拟输入端与数字输入端

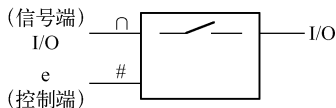


图 8-39 模拟开关的输入端

(5) 输出端引脚

数字电路输出端可分为一般输出端和反相输出端, 如图 8-40 所示。



图 8-40 输出端的类型

一般输出端，数据信号以原码的形态输出。例如，门电路的输出端，标注有字符“Y”，如图 8-41 所示。触发器的输出端，标注有字符“Q”，如图 8-42 所示。加法器的输出端中，“和”输出端标注有字符“S”，“进位”输出端标注有字符“C_o”，如图 8-43 所示。移位寄存器的输出端中，并行数据输出端标注有“Q₁、Q₂、Q₃、Q₄、……”字符，其中最后一位并行数据输出端也就是串行数据输出端，如图 8-44 所示。

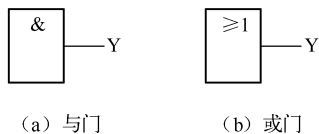


图 8-41 门电路的输出端

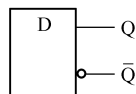


图 8-42 触发器的输出端

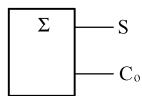


图 8-43 加法器的输出端

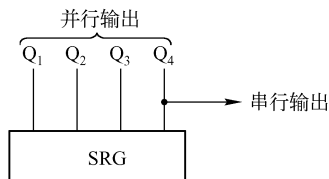


图 8-44 移位寄存器的输出端

反相输出端，数据信号以反码的形态输出。例如，门电路的反相输出端，标注有字符“ \bar{Y} ”，如图 8-45 所示，这相当于在基本门电路后面加接了一个非门。触发器的反相输出端，标注有字符“ \bar{Q} ”，见图 8-42。译码器的多个反相输出端，分别标注有字符“ \bar{Y}_1 、 \bar{Y}_2 、 \bar{Y}_3 、……”，如图 8-46 所示。

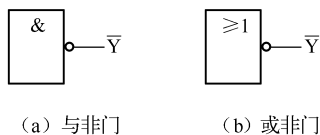


图 8-45 门电路的反相输出端

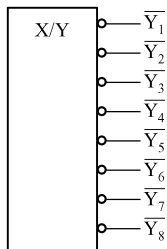


图 8-46 译码器的反相输出端

(6) 非逻辑引脚

有些数字电路还具有若干外接电阻、电容、晶体等元器件的其他引脚。这些不属于逻辑连接的连接端，在电路图中用一个“×”符号标注，如图 8-47 所示。例如，在如图 8-48 所示单稳态触发器中，其上部连接外接电阻 R_e 和外接电容 C_e 的引脚，即为不属于逻辑连接的连接端。



图 8-47 非逻辑连接端

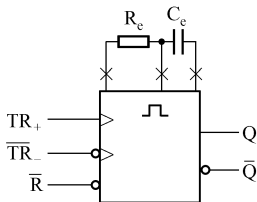


图 8-48 单稳态触发器的引脚

8.2.2 数字电路图的一般分析方法

数字电路多种多样，对于不同类型的数字电路，应根据具体电路的特点采用不同的分析方法。在一般情况下，可采用顺向看图法或逆向看图法来分析数字电路。

(1) 顺向看图法

顺向看图法，即顺着信号处理流程方向从输入端到输出端依次分析。下面举例做进一步的说明。

图 8-49 为声光控楼道灯电路，电路图中位于左边的驻极



体话筒 BM（接收声音信号）和光电二极管 VD（接收光信号）是整个电路的输入端，位于右边的照明灯 EL 是整个电路的最终负载，信号处理流程方向为从左到右。顺向看图法就是按照从左到右的顺序，从输入端到输出端依次分析。具体分析如下。

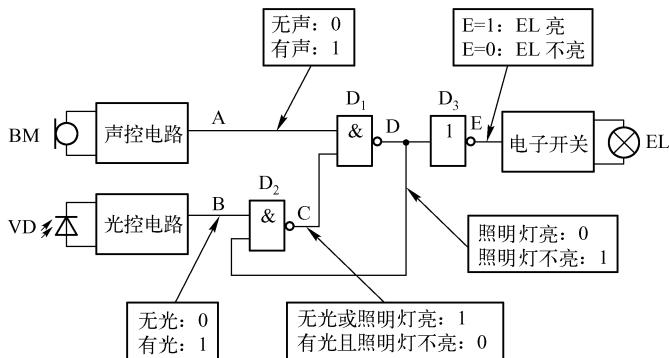


图 8-49 声光控楼道灯电路

当驻极体话筒 BM 接收到声音信号时，经声控电路放大、整形和延时后，其输出端 A 点为“1”，送入与非门 D_1 的上输入端。如果这时是在夜晚，无环境光，光控电路输出端 B 点为“0”，同时由于照明灯未亮，故 D 点为“1”，所以与非门 D_2 输出端 C 点为“1”，送入与非门 D_1 的下输入端。由于与非门 D_1 的两个输入端都为“1”，其输出端 D 点变为“0”，反相器 D_3 输出端 E 点为“1”，使电子开关导通，照明灯 EL 点亮。

由于声控电路中含有延时电路，声音信号消失后再延时一段时间，A 点电平才变为“0”，使照明灯 EL 熄灭。

当照明灯 EL 点亮时，D 点的“0”同时加至 D_2 的下输入端将其关闭，使得 B 点的光控信号无法通过。这样，即使照明灯的灯光照射到光电二极管 VD 上，系统也不会误认为是白天而造成照明灯刚点亮就立即又被关闭。

如果是在白天，则环境光被光电二极管 VD 接收，光控电路



输出端 B 点为“1”。由于照明灯未亮，故 D 点也为“1”，所以与非门 D_2 输出端 C 点为“0”，送入与非门 D_1 的下输入端，关闭了与非门 D_1 ，此时不论声控电路输出如何， D_1 输出端 D 点恒为“1”，E 点则为“0”，使电子开关关断，照明灯 EL 不亮。

通过以上分析可以知道，声光控楼道灯的逻辑控制功能为：

①白天整个楼道灯不工作；②晚上有一定响度的声音时楼道灯打开；③声音消失后楼道灯延时一段时间才关闭；④照明灯点亮后不会被误认为是白天。

(2) 逆向看图法

逆向看图法，即逆着信号处理流程方向从输出端到输入端倒推分析。仍以如图 8-49 所示声光控楼道灯电路为例，具体分析如下。

照明灯 EL 点亮的条件是，电子开关输入端 E 点必须为“1”，即 D 点必须为“0”。

D 点为“0”的条件是与非门 D_1 的两个输入端都为“1”。 D_1 的上输入端连接的是声控电路的输出端 A，有声时 $A = 1$ ，无声时 $A = 0$ 。 D_1 的下输入端受与非门 D_2 输出端 C 点控制，而 D_2 的两个输入端分别接光控电路输出端 B 点和照明灯信号 D 点，在无环境光或照明灯已亮时 $C = 1$ ，在有较强环境光且照明灯未亮时 $C = 0$ 。

通过以上分析可知，在白天环境光较强时，照明灯 EL 被关闭。在夜晚，照明灯 EL 则受声控电路的控制，有声音时亮，声音消失且延时一定时间后关闭。这个分析结果与顺向看图法一致。

8.2.3 组合逻辑电路的分析方法

组合逻辑电路包括各种编码器、译码器、加法器、数值比较器、数据选择与分配器等。组合逻辑电路的基础单元是门电路。组合逻辑电路可以具有一个或多个输入端，同时具有一个或多个输出端，如图 8-50 所示。



图 8-50 组合逻辑电路的引脚

组合逻辑电路的特点是，输出信号的状态仅与当时输入信号的状态有关，而与该时刻之前的电路状态无关。分析组合逻辑电路的关键是正确应用逻辑代数。

(1) 运用逻辑函数表达式进行分析

组合逻辑电路可以运用逻辑函数表达式进行分析。具体方法是从组合逻辑电路的输入端到输出端，逐级写出每一个逻辑单元的逻辑函数表达式，得出最终的逻辑函数表达式，并化简为最简形式，即可据此确定该电路的逻辑功能。

下面以如图 8-51 所示组合逻辑电路为例进行具体说明。

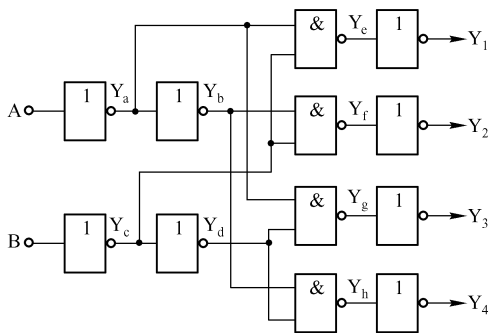


图 8-51 2 线 -4 线译码器电路

该组合逻辑电路具有两个输入端 A 和 B，具有 4 个输出端 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 。各级逻辑函数表达式如下：

$$Y_a = \overline{A}$$

$$Y_b = A$$

$$Y_c = \overline{B}$$



$$Y_d = B$$

$$Y_e = \overline{Y_a Y_c}$$

$$Y_f = \overline{Y_b Y_c}$$

$$Y_g = \overline{Y_a Y_d}$$

$$Y_h = \overline{Y_b Y_d}$$

$$Y_1 = \overline{Y_e} = Y_a Y_c = \overline{AB}$$

$$Y_2 = \overline{Y_f} = Y_b Y_c = A \overline{B}$$

$$Y_3 = \overline{Y_g} = Y_a Y_d = \overline{AB}$$

$$Y_4 = \overline{Y_h} = Y_b Y_d = AB$$

从上述逻辑函数表达式可知，当输入端 $AB = 00$ 时，输出端 $Y_1 = 1$ ；当输入端 $AB = 10$ 时，输出端 $Y_2 = 1$ ；当输入端 $AB = 01$ 时，输出端 $Y_3 = 1$ ；当输入端 $AB = 11$ 时，输出端 $Y_4 = 1$ 。可见，这是一个 2 线 - 4 线译码器，其功能是将 2 位二进制码译码后，从 4 个输出端中所对应的那一个输出端输出。

(2) 运用逻辑函数真值表进行分析

组合逻辑电路还可以运用逻辑函数真值表进行分析。具体方法是列出组合逻辑电路所有输入端与所有输出端之间的逻辑函数真值表，然后根据真值表判断出电路的逻辑功能。下面举例说明。

某组合逻辑电路如图 8-52 所示，包含 3 个逻辑门电路：或门 D_1 、与非门 D_2 和与门 D_3 。电路具有 3 个输入端 A、B、C 和 1 个输出端 Y。A、B、C 共有 8 种组合状态，并对应相应的输出状态，逐一分析如下。

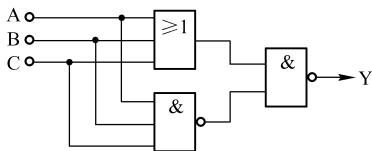


图 8-52 逻辑不一致电路



① 当 $ABC = 000$ 时, D_1 输出为 0, D_2 输出为 1, D_3 输出端 $Y = 0$ 。

② 当 $ABC = 001$ 时, D_1 输出为 1, D_2 输出为 1, $Y = 1$ 。

③ 当 $ABC = 010$ 时, D_1 输出为 1, D_2 输出为 1, $Y = 1$ 。

.....

⑧ 当 $ABC = 111$ 时, D_1 输出为 1, D_2 输出为 0, $Y = 0$ 。

根据以上分析结果得到的逻辑函数真值表见表 8-1。

表 8-1 逻辑不一致电路真值表

输 入			输 出
A	B	C	Y
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	0

从逻辑函数真值表可见, 只有当 $ABC = 000$ 或者 $ABC = 111$ 时, 才有 $Y = 0$; 否则, $Y = 1$ 。所以, 这是一个逻辑不一致电路, 当 3 个输入端的输入逻辑状态不一致时, 电路输出为 1; 当 3 个输入端的输入逻辑状态一致时, 电路输出为 0。

8.2.4 时序逻辑电路的分析方法

时序逻辑电路包括各种移位寄存器和计数器等。时序逻辑电路一般由组合逻辑电路和存储电路两部分组成, 如图 8-53 所示。存储电路的核心单元是触发器, 它将电路的输出状态存储下来并反馈到电路的输入端, 因此时序逻辑电路具有记忆功能。

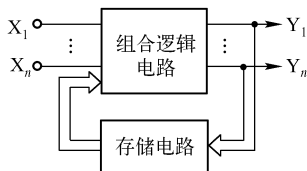


图 8-53 时序逻辑电路

时序逻辑电路的特点是，任一时刻输出信号的状态不仅与当时的输入信号的状态有关，而且还与原来的电路状态有关，即与前一时刻的输入信号的状态有关。分析时序逻辑电路一定要抓住与时间有关这个关键。

(1) 运用状态转换表进行分析

状态转换表是时序逻辑电路的真值表，它按时间顺序列出了每一时刻的输入状态和输出状态。需要特别注意的是，这里所说的输入状态包含该时刻输入信号的状态和前一时刻输出信号的状态。通过状态转换表可以清晰地看出时序逻辑电路的工作过程。

例如，图 8-54 为二 - 十进制计数器电路，由 4 个 D 触发器串联组成。每个 D 触发器的反相输出端 \bar{Q} 与本身的数据输入端 D 相连接，构成双稳态触发器。

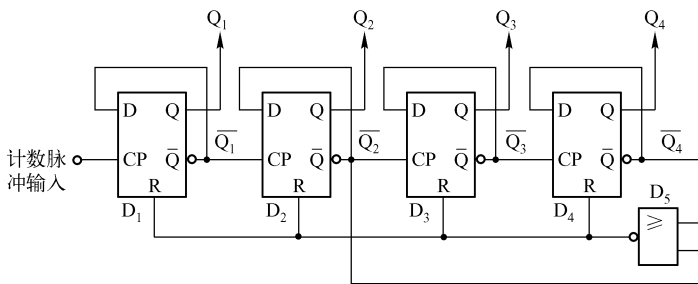


图 8-54 二 - 十进制计数器电路

计数脉冲从第一个双稳态触发器 D_1 的 CP 端输入，每一级的 \bar{Q} 端接入下一级的 CP 端，因此，每输入 1 个 (2^0) 计数脉冲，



D_1 就翻转一次；每输入2个(2^1)计数脉冲， D_2 就翻转一次；每输入4个(2^2)计数脉冲， D_3 就翻转一次；每输入8个(2^3)计数脉冲， D_4 就翻转一次。

或非门 D_5 的作用是，当输入第10个计数脉冲时输出一清零信号，使4个D触发器全部为0，即返回起始状态，实现十进制计数。

计数结果由 Q_4 、 Q_3 、 Q_2 、 Q_1 输出。将以上分析结果列表，就是二—十进制计数器状态转换表，见表8-2。从状态转换表中可以非常清楚地看出二—十进制计数器的工作过程。

表8-2 二—十进制计数器状态转换表

输入时序	输出状态			
	Q_4	Q_3	Q_2	Q_1
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0

(2) 运用时序波形图进行分析

时序波形图是以时钟脉冲为基准，将每一个输入端和每一个输出端的状态，以随时间而变化的波形的形式一一对应地画在一起。通过时序波形图能够直观地看出时序逻辑电路的工作过程。

例如，图8-55为4位右移移位寄存器电路，移存单元为4



个 D 触发器，串行输入数据 D_0 在时钟脉冲 CP 上升沿的触发下向右移位， Q_4 、 Q_3 、 Q_2 、 Q_1 为并行输出端， Q_4 同时为串行输出端。

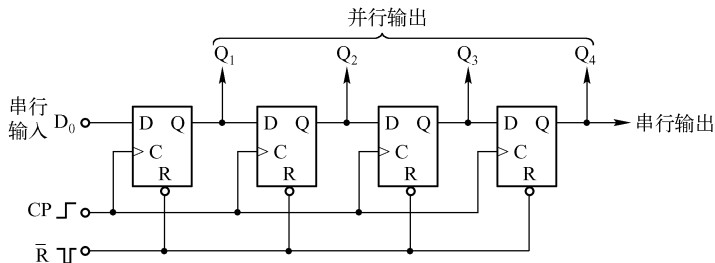


图 8-55 4 位右移位寄存器电路

每一个时钟脉冲 CP 上升沿到来时，串行输入数据 D_0 进入 D_1 ， D_1 数据进入 D_2 ， D_2 数据进入 D_3 ， D_3 数据进入 D_4 ， D_4 数据移出寄存器。图 8-56 为该移位寄存器的时序波形图。

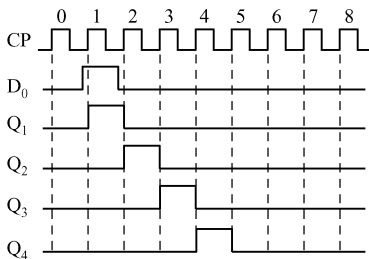


图 8-56 移位寄存器的时序波形图

移位寄存器工作过程如下。

① 设初始状态为 0000，从时序波形图可见，当第 1 个 CP 脉冲上升沿到来时， D_0 的 1 进入触发器 D_1 ， $Q_1 = 1$ 。

② 当第 2 个 CP 脉冲上升沿到来时， Q_1 的 1 进入触发器 D_2 ， $Q_2 = 1$ 。

③ 以此类推，经过 4 个 CP 脉冲后， D_0 的 1 到达 D_4 ， $Q_4 = 1$ 。

如果该移位寄存器有初始数据，那么经过 4 个 CP 脉冲周期



后，其初始数据串行移出了寄存器， D_0 的4位串行输入数据进入了寄存器。数据移位流程如图8-57所示。

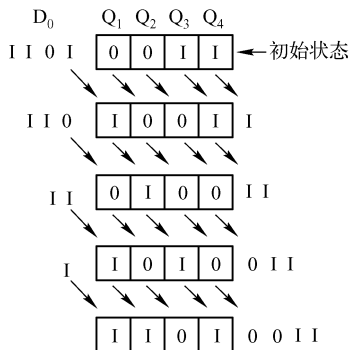







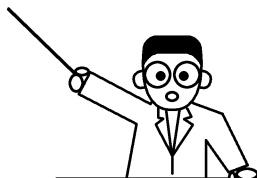


图8-57 数据移位流程

第 9 章

解剖麻雀——巧看单元电路

-  9.1 单元电路的基本看图方法与技巧
-  9.2 电压放大电路分析技巧
-  9.3 功率放大电路分析技巧
-  9.4 正弦波振荡器电路分析技巧
-  9.5 多谐振荡器电路分析技巧
-  9.6 整流滤波电路分析技巧
-  9.7 稳压电路分析技巧



看图识电子电路图



单元电路是由若干元器件构成、具有某种特定功能的基本电路,是组成电路图的“器官”。熟练掌握各种基本单元电路的结构、原理和分析方法,才能够看懂整个电路图。



9.1 单元电路的基本看图方法与技巧

单元电路多种多样,具有各自不同的电路结构和特点。本节主要介绍单元电路的基本看图方法与技巧。



9.1.1 了解单元电路的作用与功能

分析单元电路首先应了解该单元电路的作用与功能,这从整机电路方框图中很容易搞清楚。单元电路种类众多,可分为放大电路、振荡电路、滤波电路、调制与解调电路及电源电路等,它们各自具有独特的作用与功能。

(1) 放大电路的作用是对输入信号进行放大,常见的放大电路有电压放大器、电流放大器、功率放大器等。电压跟随器是电压放大倍数等于1的放大电路。其作用是阻抗变换和缓冲。

(2) 振荡电路的作用是产生信号电压,包括正弦波振荡器和其他波形振荡器。

(3) 有源滤波电路的作用是限制通过信号的频率,包括低通有源滤波器、高通有源滤波器、带通有源滤波器和带阻有源滤波器。

(4) 调制电路的作用是将信号电压调制到载频上,调制方法包括调幅、调频和调相。解调电路的作用是从已调载频中解调出信号电压,检波电路和鉴频电路都属于解调电路。

(5) 电源电路的作用是为其他电路提供工作电源或实现电源转换。常见的电源单元电路有整流电路、滤波电路、稳压电路、恒流电路和电源变换电路等。它们具有不同的作用与功能,如整流滤波电路的作用是将交流电变换为直流电,稳压电路的作用是提供稳定的工作电压,恒流源电路的作用是提供恒定的电流,逆



变电路的作用是将直流电变换为交流电，直流变换电路的作用是将一种直流电变换为另一种直流电，等等。

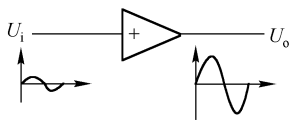
9.1.2 分析输入与输出的关系

除了振荡器等信号产生电路外，一般单元电路都有信号输入端和信号输出端，单元电路按照其既定的作用与功能，对输入信号进行处理、加工或变换，然后输出。

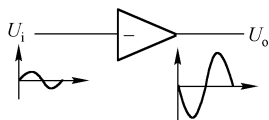
特定的单元电路，其输出信号与输入信号之间存在特定的函数关系。弄清楚输入信号与输出信号的关系，对于分析单元电路十分重要，特别是许多由专门集成电路构成的单元电路，更是只能从输入信号与输出信号的关系上来加以分析。主要几类单元电路的输入信号与输出信号之间具有以下的特定关系。

(1) 放大单元电路的输入、输出关系

放大单元电路的输出信号幅度是输入信号幅度的若干倍，其他特征不变。其中，同相放大器输出信号与输入信号相位相同，反相放大器输出信号与输入信号相位相反，如图 9-1 所示。电压跟随器可理解为放大倍数 $A = 1$ 的放大器。衰减器可理解为放大倍数为负数的放大器。



(a) 同相放大器



(b) 反相放大器

图 9-1 放大单元电路

(2) 滤波单元电路的输入、输出关系

滤波单元电路的输入信号中只有符合要求的特定频率部分能够到达输出端，不符合的部分则被滤除。例如，高通滤波器只允许频率高于转折频率 f_0 的信号通过，低通滤波器只允许频率低于转折频率 f_0 的信号通过，带通滤波器只允许频率处于高低转折频



率 f_2 与 f_1 之间的信号通过，带阻滤波器只允许频率低于低端转折频率 f_1 或高于高端转折频率 f_2 的信号通过，如图9-2所示。

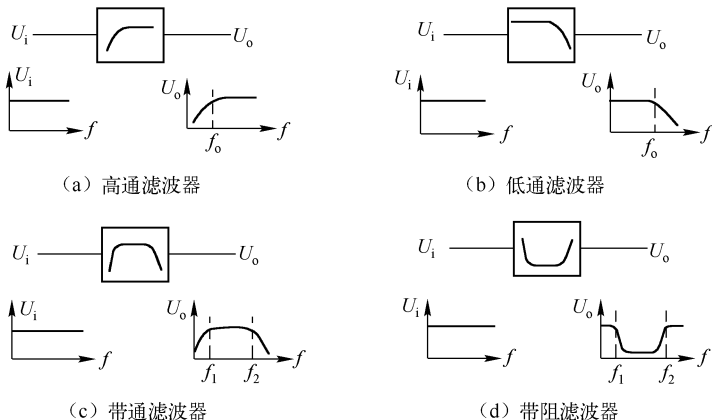


图9-2 滤波单元电路

(3) 调制与解调单元电路的输入、输出关系

调制单元电路一般具有两个输入端和一个输出端。两个输入信号分别是调制信号和载频信号。输出信号是含有输入调制信号信息的载频信号。调制方式主要有调幅、调频、调相等。图9-3 (a) 为调幅电路示意图。图9-3 (b) 为调频电路示意图。

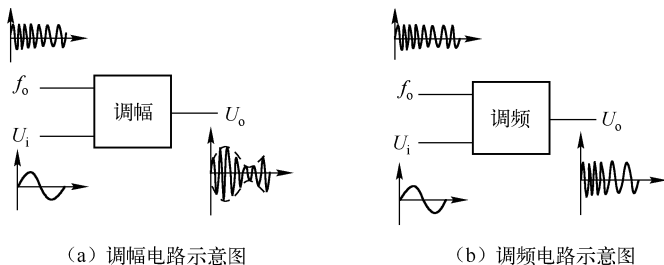


图9-3 调制单元电路

解调单元电路则正好相反，输入的是含有调制信号信息的载



频信号，输出的是调制信号，载频已被滤除。

(4) 信号发生单元电路

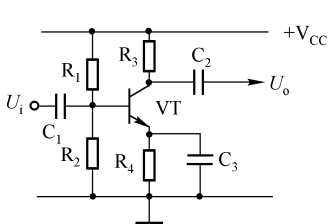
信号发生单元电路一般没有输入端而只有输出端，向外提供特定的输出信号。有些信号发生电路具有控制端，用以对振荡信号进行参数调节或振荡控制。

9.1.3 单元电路的结构特点

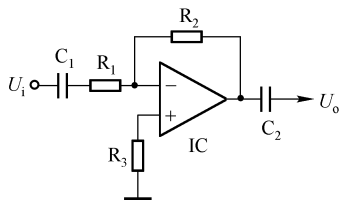
很多常见的单元电路，如放大器、振荡器、电压跟随器、电压比较器、有源滤波器等，往往具有特定的电路结构，掌握常见的单元电路的结构特点，对于看图识图会有很大的帮助。

(1) 放大单元电路的结构特点

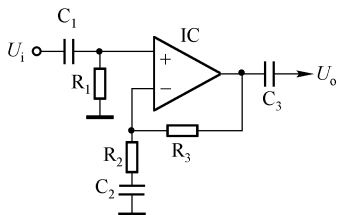
放大单元电路的结构特点是具有一个输入端和一个输出端，在输入端与输出端之间是晶体管或集成运放等放大器件，如图 9-4 所示。有些放大器具有负反馈。如果输出信号由晶体管发射极引出，则是射极跟随器电路。



(a) 晶体管放大器



(b) 集成运放反相放大器



(c) 集成运放同相放大器

图 9-4 放大单元电路的结构

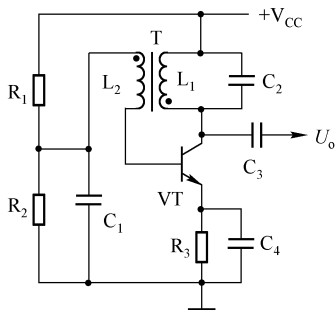


(2) 振荡单元电路的结构特点

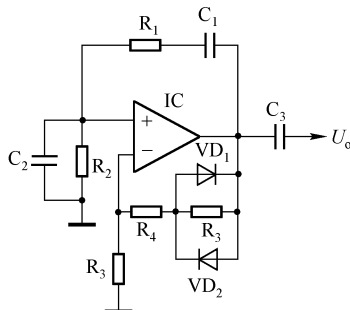
振荡单元电路的结构特点是没有对外的电路输入端，晶体管或集成运放的输出端与输入端之间接有一个具有选频功能的正反馈网络，将输出信号的一部分正反馈到输入端以形成振荡。

图 9-5 (a) 为晶体管振荡器，晶体管 VT 的集电极输出信号，由变压器 T 倒相后正反馈到基极，T 的初级线圈 L_1 与 C_2 组成选频回路，决定电路的振荡频率。

图 9-5 (b) 为集成运放振荡器，在集成运放 IC 的输出端与同相输入端之间，接有由 R_1 、 C_1 、 R_2 、 C_2 组成的桥式选频反馈回路，IC 输出信号的一部分经桥式选频回路反馈到输入端，振荡频率由组成选频回路的 R_1 、 C_1 、 R_2 、 C_2 的数值决定。



(a) 晶体管振荡器



(b) 集成运放振荡器

图 9-5 振荡单元电路的结构

(3) 差动放大器的结构特点

差动放大器的结构特点是具有两个输入端（正输入端和负输入端）和一个输出端，如图 9-6 所示。集成运放 IC 的输出端与反相输入端之间接有一反馈电阻 R_3 ，使 IC 工作于线性放大状态，输出信号是两个输入信号差值的 A 倍 $\left(A = \frac{R_3}{R_1}\right)$ 。

(4) 滤波单元电路的结构特点

滤波单元电路的结构特点是含有电容器或电感器等具有频率



函数的元件。有源滤波器还含有晶体管或集成运放等有源器件，在有源器件的输出端与输入端之间接有反馈元件。

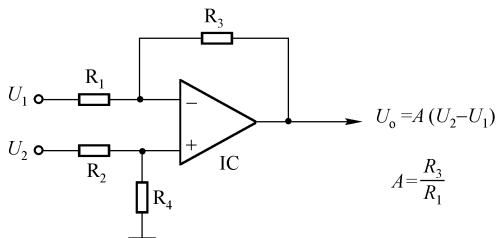
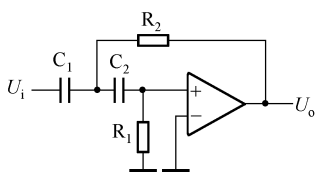
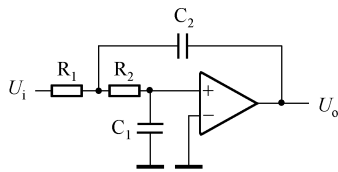


图 9-6 差动放大器的结构

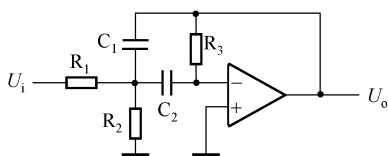
由于电感器比较笨重，有源滤波器通常采用电容器作为滤波元件，如图 9-7 所示。高通滤波器电路中电容器接在信号通路，低通滤波器电路中电容器接在旁路或负反馈回路，带通滤波器在信号通路和负反馈回路中都有电容器。



(a) 高通滤波器



(b) 低通滤波器



(c) 带通滤波器

图 9-7 滤波单元电路的结构



9.1.4 等效电路分析法

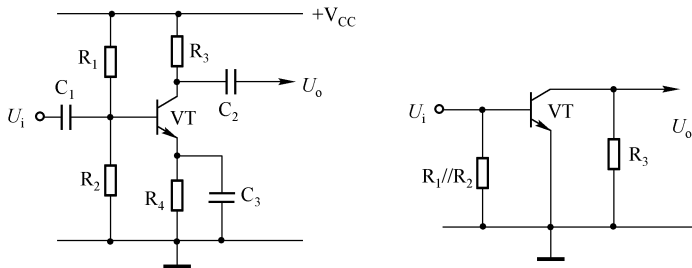
放大器、振荡器、有源滤波器等单元电路都包括交流回路和



直流回路，并且互相交织在一起，有些元器件只在一个回路中起作用，有些元器件在两个回路中都起作用。为了方便、更清晰地分析单元电路，可以分别画出交流等效电路和直流等效电路。

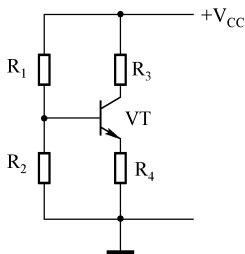
(1) 交流等效电路

交流回路是单元电路处理交流信号的通路。对于交流信号而言，电路图中的耦合电容和旁路电容都视为短路；电源对交流的阻抗很小，且电源两端并接有大容量的滤波电容，也视为短路，这样便可绘出其交流等效电路。例如，图 9-8 (a) 为晶体管放大器电路，按照上述方法绘出的交流等效电路如图 9-8 (b) 所示。



(a) 晶体管放大器电路

(b) 交流等效电路



(c) 直流等效电路

图 9-8 放大器及其等效电路

(2) 直流等效电路

直流回路为单元电路提供正常工作所必须的电源条件。对于



直流而言,电路图中所有电容均视为开路,很容易绘出其直流等效电路。图 9-8 (a) 为晶体管放大器电路,直流等效电路如图 9-8 (c) 所示。直流回路为晶体管 VT 提供直流工作电源和合适的静态工作点。



9.2 电压放大电路分析技巧

电压放大电路是各种电路图中最基本的、使用最多的单元电路。电压放大电路的基本功能和作用是放大电压信号,当一级电压放大单元不能满足整机电路的要求时,往往采用多级电压放大单元串联工作。电压放大电路可以由晶体管、电子管、集成运算放大器等元器件构成,并且具有多种电路形式。



9.2.1 单管电压放大电路

晶体管放大电路有 3 种基本连接方式,即共发射极接法、共基极接法和共集电极接法,如图 9-9 所示。在共发射极电路中,发射极为输入、输出回路的交流公共端。在共基极电路中,基极为输入、输出回路的交流公共端。在共集电极电路中,集电极为输入、输出回路的交流公共端。一般做电压放大时,常采用共发射极电路。

(1) 单管基本放大电路

单管基本放大电路是最基本的放大电路。图 9-10 为一个典型的共发射极电压放大电路,VT 为放大晶体管, R_1 、 R_2 为基极偏置电阻, R_3 为集电极电阻, R_4 为发射极电阻, C_1 、 C_2 为耦合电容, C_3 为发射极旁路电容。

(2) 直流工作点的建立和稳定

晶体管放大电路能够正常工作的前提是必须使晶体管有合适的直流工作点,并保持工作点的稳定。单管共发射极电压放大电路是如何建立和稳定直流工作点的呢?为了分析方便,将如图 9-10 所示电路图交流回路略去,画出该电路的直流回路如图 9-11 所示。

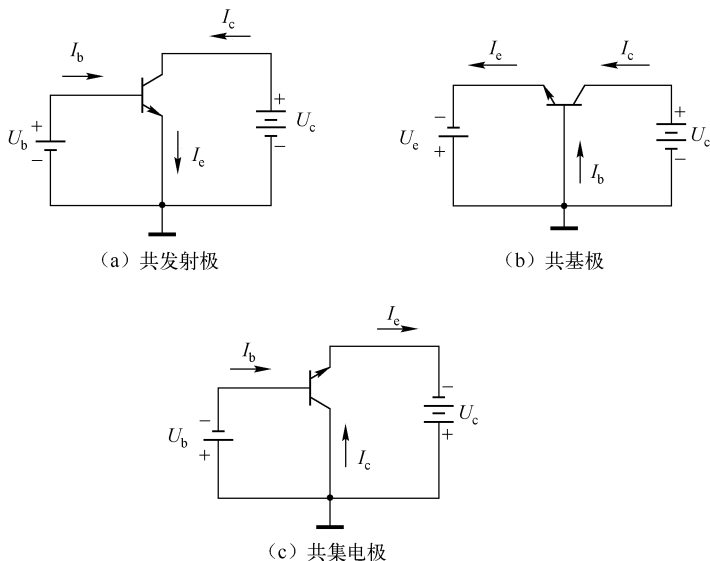


图 9-9 晶体管放大电路的 3 种基本形式

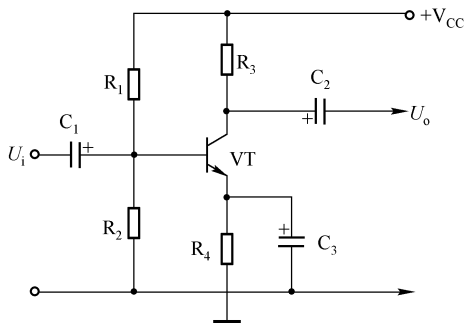


图 9-10 共发射极电压放大电路

从直流等效电路图中可见，除集电极电阻 R_3 外，其余 3 个电阻 (R_1 、 R_2 、 R_4) 都是用来建立和稳定 VT 的直流工作点的。 R_1 、 R_2 将电源电压分压后作为 VT 的偏置电压（即工作点），发射极电阻 R_4 上形成的电流负反馈具有稳定工作点的作用。工作点的稳定过程如图 9-12 所示。

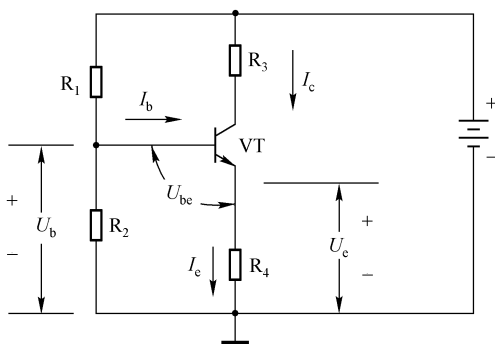


图 9-11 直流回路

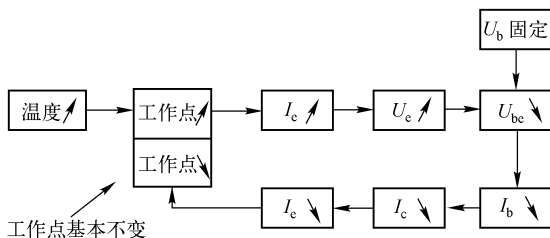


图 9-12 工作点的稳定过程

当温度上升造成工作点上升时，VT 的发射极电流 I_e 增大，使 R_4 上的电压降（即 VT 的发射极电压 U_e ）上升。由于 VT 的基极偏置电压 U_b 是固定的（由 R_1 、 R_2 分压所得），因此发射极电压 U_e 上升必然使 VT 的基极 - 发射极间电压 U_{be} 下降。 U_{be} 下降使得基极电流 I_b 下降，导致 VT 的集电极电流 I_c 和发射极电流 I_e 随之下降，迫使工作点回落，其结果是保持工作点基本不变。

当因某种原因造成工作点下降时，则电路按相反的方向自动进行调整，最终使工作点保持基本稳定。

(3) 交流信号的放大

共发射极电压放大电路的交流回路如图 9-13 所示。对交流信号而言，电容 $C_1 \sim C_3$ 相当于短路，电池也可视为短路。 R_b 为



晶体管 VT 的基极电阻, R_b 等于如图 9-10 所示电路中偏置电阻 R_1 与 R_2 的并联值, 即 $R_b = R_1 // R_2$ 。 R_c 为 VT 的集电极负载电阻, 在放大器输出端开路 (U_o 端未接负载) 的情况下, R_c 就是如图 9-10 所示电路中的 R_3 , 即 $R_c = R_3$ 。

当在放大电路输入端 (VT 基极) 加入一个交流信号电压 U_i 时, 晶体管 VT 的基极电流 I_b 将随 U_i 的变化而变化, 使其集电极电流 I_c 也随之变化, 并在负载电阻 R_c 上产生电压降。因为晶体管 VT 的集电极电流 I_c 是基极电流 I_b 的 β 倍, 所以在其集电极处便得到一个放大了的输出电压 U_o 。由于在共发射极电压放大电路中, 输出电压是电源电压与集电极电流在集电极电阻上压降的差值, 因此输出电压 U_o 与输入电压 U_i 相位相反, 集电极电流 I_c 与输入电压 U_i 相位相同。放大器各点波形如图 9-14 所示。

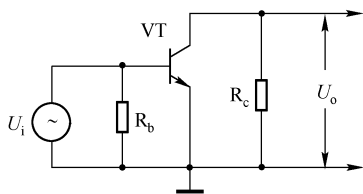


图 9-13 共发射极电压放大电路的交流回路

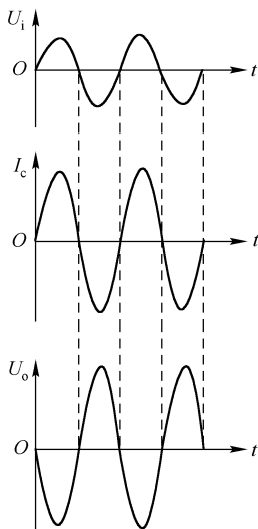


图 9-14 放大器各点波形的交流回路



9.2.2 双管电压放大电路

采用两只晶体管可以构成双管电压放大单元，电路如图9-15所示。晶体管 VT_1 、 VT_2 之间为直接耦合，没有耦合电容。双管电压放大电路的主要特点是电压增益高、工作点稳定度高、偏置电阻无须调整和电路较为简单。

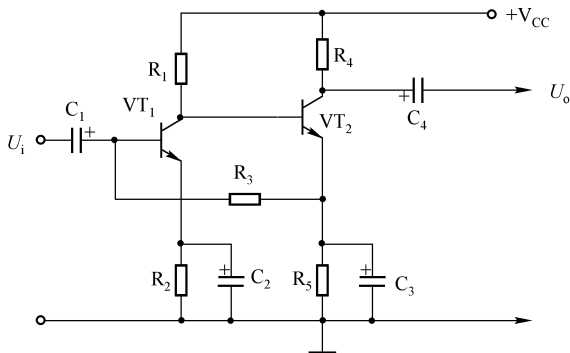


图9-15 双管电压放大电路

(1) 双管放大电路工作点的建立和稳定

图9-16为双管电压放大电路的直流回路。 VT_1 的基极偏压不是取自电源电压，而是通过 R_3 取自 VT_2 的发射极电压。这样就构成了二级直流负反馈，使整个电路工作点更加稳定。该电路一经设计完毕，两管工作点即已固定，因此无须调整偏置电阻。

(2) 工作点的稳定过程

如果因温度上升等原因造成晶体管 VT_1 的集电极电流 I_{c1} 上升，则集电极电压 U_{c1} 必然下降。因为 VT_1 的集电极电压 U_{c1} 就是 VT_2 的基极电压 U_{b2} ， U_{b2} 下降使得 VT_2 的集电极电流 I_{c2} 和发射极电流 I_{e2} 均随之下降， VT_2 发射极电阻 R_5 上的电压降（即 VT_2 发射极电压 U_{e2} ）也就下降。 U_{e2} 的下降通过偏置电阻 R_3 反馈到 VT_1 基极，使 VT_1 基极电压 U_{b1} 下降，基极电流 I_{b1} 下降，迫使集电极电



流 I_{c1} 回落，从而使工作点保持稳定，如图 9-17 所示。

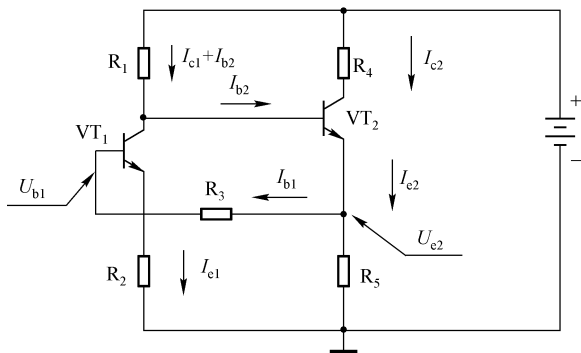


图 9-16 双管放大电路的直流回路

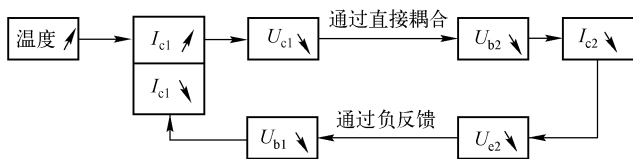


图 9-17 工作点的稳定过程

当工作点受到某种因素影响而下降时，双管放大电路也能够自动调控保持工作点的稳定，只是调控方向与如图 9-17 所示相反。

(3) 交流信号的放大

双管电压放大电路交流回路如图 9-18 所示，包括二级共发射极放大电路， R_b 为 VT_1 的基极电阻； R_{c1} ，既是 VT_1 的集电极电阻，又是 VT_2 的基极电阻； R_{c2} 是 VT_2 的集电极电阻。 U_i 为输入电压； U_{c1} 既是 VT_1 的输出电压，又是 VT_2 的输入电压； $U_o = U_{c2}$ ，既是 VT_2 的输出电压，又是整个放大电路的输出电压。

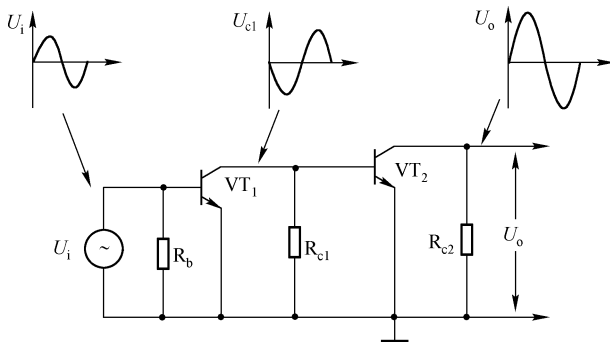


图 9-18 双管电压放大电路的交流回路

双管电压放大电路总的电压放大倍数等于 VT_1 和 VT_2 两级电压放大倍数的乘积。从如图 9-18 所示的波形可见，双管电压放大电路的输出电压 U_o 与输入电压 U_i 同相。

9.2.3 具有负反馈的电压放大电路

具有负反馈的电压放大电路简称为负反馈放大器。其电路结构方框图如图 9-19 所示。负反馈放大器一般由两部分组成：一是基本电压放大电路；二是负反馈网络。

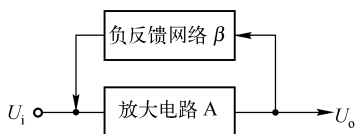


图 9-19 负反馈放大器电路结构方框图

(1) 负反馈放大器的特点

负反馈实质上就是把输出电压的一部分再送回到输入端，并使其与输入电压相位相反。负反馈可以明显改善电压放大器的性能指标，使其失真减小、噪声降低、频响展宽、稳定度提高，而这些好处都是以牺牲放大器增益为代价的。由于增益可以用多级放大器来保障，而很多场合对放大器的性能指标要求严格，因此



负反馈放大器得到普遍采用。

(2) 负反馈放大器的种类

根据反馈信号是依赖于输出电压还是输出电流，负反馈可分为电压负反馈和电流负反馈两类。根据反馈电路与输入信号电压的连接方式，负反馈又可分为串联负反馈和并联负反馈两类。因此，负反馈放大器可分为4类：串联电流负反馈、串联电压负反馈、并联电流负反馈和并联电压负反馈。使用较多的是串联电流负反馈放大器和并联电压负反馈放大器。

(3) 串联电流负反馈放大器

图9-20为典型的串联电流负反馈放大电路，晶体管VT的发射极电阻 R_e 为反馈元件， R_e 上电压降即为反馈电压 U_β 。 R_b 为基极电阻， R_c 为集电极电阻。

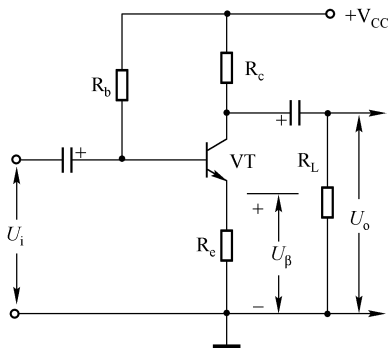


图9-20 串联电流负反馈放大电路

如果将电路输出端（ U_o 两端）短路，使输出电压 $U_o=0$ ，这时 R_e 上的反馈信号 U_β 依然存在，因此这是电流负反馈。 R_e 上的反馈信号 U_β 是与输入信号电压 U_i 相串联后加在晶体管VT的基极与发射极之间的，属于串联负反馈。综合起来看，这是一个串联电流负反馈放大电路。图9-21为其电路原理。

串联电流负反馈放大电路的工作原理是：输出信号电流 I_o 在VT的发射极电阻 R_e 上产生电压降 U_β ，由于 R_e 又串联在放大器



的输入信号回路中, 因此 U_β 与输入信号电压 U_i 相串联, 且极性相反。由于反馈电压 U_β 抵消了一部分输入信号电压 U_i , 所以放大器加入串联电流负反馈后, 电压放大倍数降低, 电流放大倍数基本不变, 输入阻抗增大, 输出阻抗略有增加。

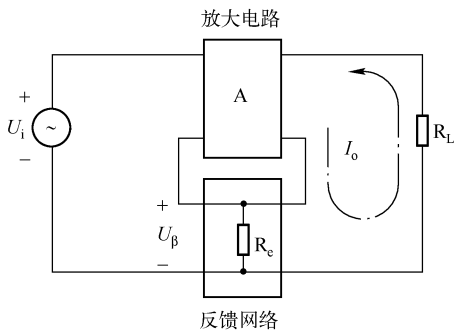


图 9-21 串联电流负反馈放大电路原理

(4) 并联电压负反馈放大器

图 9-22 为典型的并联电压负反馈放大电路, 晶体管 VT 的基极电阻 R_b 为反馈元件, 反馈电压 U_β 取自负载电阻 R_L 上的输出电压 U_o 。 R_c 为集电极电阻。

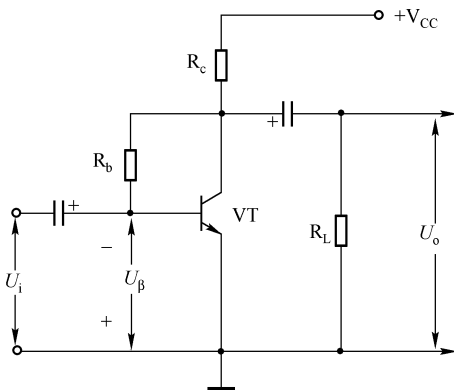


图 9-22 并联电压负反馈放大电路



如果将电路输出端 (U_o 两端) 短路, 使输出电压 $U_o = 0$, 这时反馈信号 U_β 将不复存在, 因此这是电压负反馈。反馈信号 U_β 通过 R_b 与输入信号电压 U_i 相并联后加在晶体管 VT 的基极与发射极之间的, 属于并联负反馈。所以这是一个并联电压负反馈放大电路。图 9-23 为其电路原理。

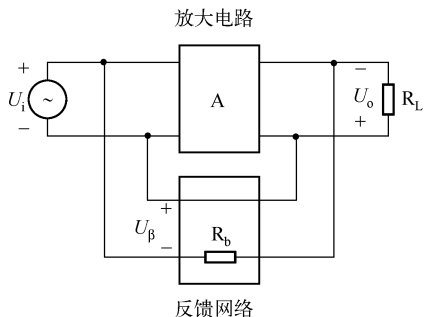


图 9-23 并联电压负反馈放大电路原理

并联电压负反馈放大电路的工作原理是: 反馈电压 U_β 取自输出电压 U_o , 与输入信号电压 U_i 相并联, 且极性相反。由于反馈电压 U_β 分流了一部分输入信号电压 U_i , 所以放大器加入并联电压负反馈后, 电压放大倍数基本不变, 电流放大倍数降低, 输入阻抗降低, 输出阻抗也降低。

(5) 多级负反馈放大器

为了进一步提高负反馈放大器的性能, 往往采用多级负反馈放大电路。图 9-24 为三级负反馈放大器示意图。 A_1 、 A_2 、 A_3 为三级放大器, R 为反馈元件。多级放大器具有更高的开环增益, 可以采用更大的反馈深度, 充分发挥负反馈的效果。

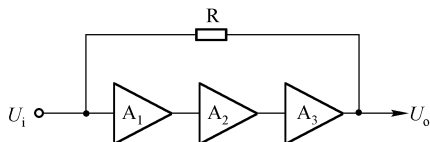


图 9-24 三级负反馈放大电路示意图



9.2.4 集成运放电压放大电路

集成运算放大器实质上是一个高增益的多级直接耦合放大器，具有很大的开环电压放大倍数（一般可达 10^5 ，即 100dB 以上）和极高的输入阻抗（可达 $10^6 \Omega$ ，采用场效应管输入级的可达 $10^9 \Omega$ 以上）。

（1）集成运放电压放大器的特点

在集成运放使用中一般加入深度负反馈，由于其开环增益很大，所以闭环增益仅由反馈电阻决定。使用集成运放构成的电压放大电路，具有电压增益大、输入阻抗高、外围电路简单、工作稳定可靠的特点。

集成运放通常有 3 种基本接法：同相输入、反相输入和差动输入。用集成运放构成的电压放大器也就有 3 种：同相输入电压放大器、反相输入电压放大器和差动输入电压放大器。

（2）同相输入电压放大器

图 9-25 为同相输入电压放大器电路，输入信号电压 U_i 加在集成运放的同相输入端（“+”端），输出信号 U_o 与输入信号 U_i 相位相同，放大倍数 $A = \frac{U_o}{U_i} \approx 1 + \frac{R_f}{R_1}$ 。RP 为平衡电阻，用以平衡由于输入偏置电流造成的失调。RP = $(R_1 // R_f)$ 。

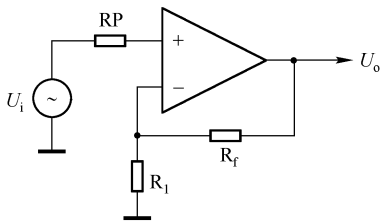


图 9-25 同相输入电压放大器电路

（3）反相输入电压放大器

图 9-26 为反相输入电压放大器电路，输入信号电压 U_i 加在



集成运放的反相输入端（“-”端），输出信号 U_o 与输入信号 U_i 相位相反，放大倍数 $A = \frac{U_o}{U_i} \approx -\frac{R_f}{R_1}$ 。RP 为平衡电阻。

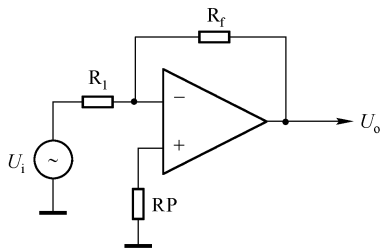


图 9-26 反相输入电压放大器电路

(4) 差动输入电压放大器

图 9-27 为差动输入电压放大器电路，一般有两个输入信号电压 U_1 和 U_2 ，输入信号电压 U_1 加在集成运放的反相输入端（“-”端），输入信号电压 U_2 加在集成运放的同相输入端（“+”端），两个输入信号电压 U_2 与 U_1 的差值得到放大，输出信号 U_o 与输入信号（ $U_2 - U_1$ ）同相，放大倍数 $A = \frac{U_o}{U_2 - U_1} \approx \frac{R_f}{R_1}$ 。

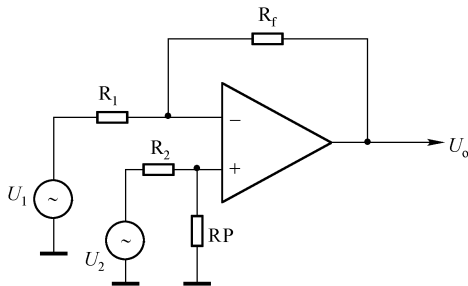


图 9-27 差动输入电压放大器电路

9.2.5 电压跟随器

电压跟随器具有很高的输入阻抗和很低的输出阻抗，是最常



用的阻抗变换和匹配电路。电压跟随器常用作电路的输入缓冲级和输出缓冲级，如图 9-28 所示。作为整个电路的高阻抗输入级，可以减轻对信号源的影响。作为整个电路的低阻抗输出级，可以提高带负载的能力。电压跟随器一般由晶体管或集成运算放大器构成。

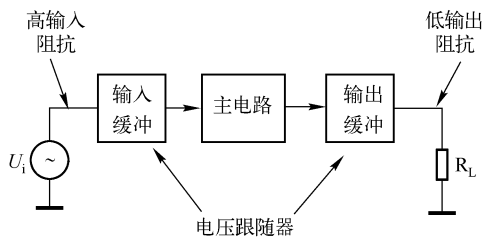


图 9-28 电压跟随器的缓冲作用

(1) 晶体管射极跟随器

晶体管构成的电压跟随器的典型电路如图 9-29 所示。 R_1 为基极偏置电阻， R_2 为发射极电阻， C_1 、 C_2 分别为输入、输出耦合电容。由于电路的输出电压 U_o 从晶体管 VT 的发射极引出，并且输出电压 U_o 与输入电压 U_i 相位相同、幅度也大致相同，所以晶体管电压跟随器又叫做射极跟随器。

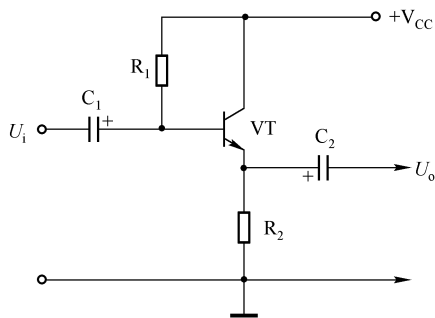


图 9-29 晶体管射极跟随器的典型电路



射极跟随器对交流而言, 电源相当于短路, 晶体管 VT 的集电极是接地的, 因此这是一个共集电极电路。图 9-30 为其交流等效电路。

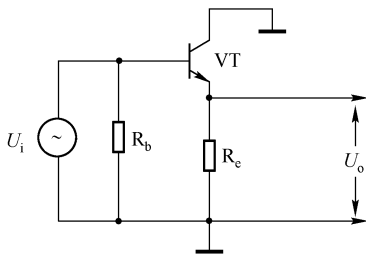


图 9-30 射极跟随器交流等效电路

射极跟随器具有输入阻抗很高、输出阻抗很低的显著特点, 如图 9-31 所示。

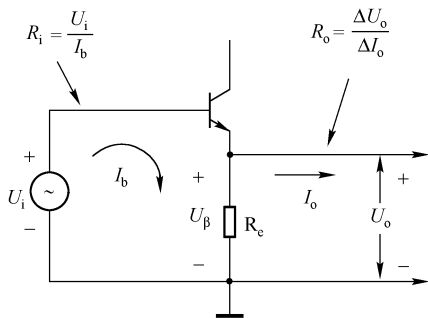


图 9-31 输入阻抗与输出阻抗

输入阻抗 R_i 是指从电路输入端看进去的阻抗, 等于输入电压 U_i 与输入电流 I_b 之比, 即 $R_i = \frac{U_i}{I_b}$ 。射极跟随器实质上是一个电压反馈系数 $F=1$ 的串联电压负反馈放大器, 输出电压 U_o 全部作为负反馈电压 U_{β} 反馈到输入回路, 抵消了绝大部分输入电压



U_i ，所以 I_b 很小。根据 $R_i = \frac{U_i}{I_b}$ 可知，射极跟随器的输入阻抗 R_i 是很高的，可达几百千欧。

输出阻抗 R_o 是指从电路输出端看进去的阻抗。需要注意的是，输出阻抗 R_o 并不等于发射极电阻 R_e ，它等于由于负载变化引起的输出电压变化量 ΔU_o 与输出电流变化量 ΔI_o 之比，即 $R_o = \frac{\Delta U_o}{\Delta I_o}$ 。这个特性也是由于电路的强负反馈作用。当负载变化引起输出电压 U_o 下降时，输入电压 U_i 被负反馈抵消的部分也随之减少，使得 U_o 回升，最终保持 U_o 基本不变。当负载变化引起输出电压 U_o 上升时，负反馈电压也随之增大，同样使得 U_o 保持基本不变。这就意味着射极跟随器的输出阻抗 R_o 是很小的，一般仅为几十欧。

(2) 集成运放电压跟随器

由于集成运放具有极高的开环增益，所以集成运放电压跟随器的性能非常接近理想状态，并且无外围元件，无须调整，这是晶体管电压跟随器（射级跟随器）所无法比拟的。集成运放电压跟随器得到了越来越广泛的应用。

集成运放电压跟随器电路如图 9-32 所示。它实际上就是 $R_f = 0$ ， $R_i = \infty$ ，反馈系数 $F = 1$ 时的同相输入放大器。由于集成运放本身的高增益特性，用集成运放构成的电压跟随器具有极高的输入阻抗，几乎不从信号源汲取电流，同时具有极低的输出阻抗，向负载输出电流时几乎不在内部引起电压降，可视为电压源。

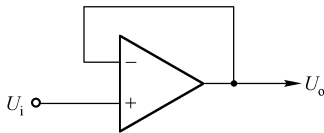


图 9-32 集成运放电压跟随器电路



9.3 功率放大电路分析技巧

功率放大器是以输出功率为主要指标的放大器。它不仅要有足够的输出电压,而且要有较大的输出电流。功率放大器工作于大信号状态,可分为甲类功率放大器、乙类功率放大器、甲乙类功率放大器。

功率放大器的主要功能和作用是对输入信号进行功率放大,以驱动扬声器、继电器、电动机等负载。功率放大器是收音机、电视机、扩音机等音响设备电路中必不可少的重要组成部分,在控制和驱动电路中也有广泛的应用。

9.3.1 单管功率放大器

单管功率放大器是最简单的功率放大器。图9-33为典型的单管功率放大器电路。VT为功率放大管,偏置电阻 R_1 、 R_2 和发射极电阻 R_3 为VT建立起稳定的工作点。 T_1 、 T_2 分别为输入、输出变压器,用于信号耦合、阻抗匹配和传送功率。 C_1 、 C_2 是旁路电容,为信号电压提供交流通路。单管功率放大器都工作于甲类状态。

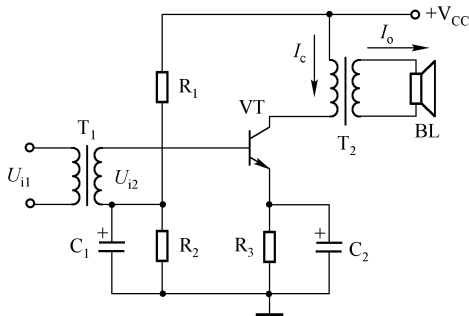


图9-33 单管功率放大器电路

单管甲类功率放大器的主要优点是电路简单,主要缺点是效率较低,因此一般适用于较小功率的放大器,或用作大功率放大器的推动级。



(1) 单管功率放大器工作过程

单管功率放大器电路工作过程为：输入交流信号电压 U_{i1} 接在输入变压器 T_1 的初级，在 T_1 次级得到耦合电压 U_{i2} 。 U_{i2} 叠加于晶体管 VT 基极的直流偏置电压（即工作点）之上，使 VT 的基极电压随输入信号电压发生变化。由于晶体管的放大作用，VT 集电极电流 I_c 亦做相应的变化，再经输出变压器 T_2 隔离直流，将交流功率输出电流 I_o 传递给扬声器 BL。电路各点波形如图 9-34 所示。

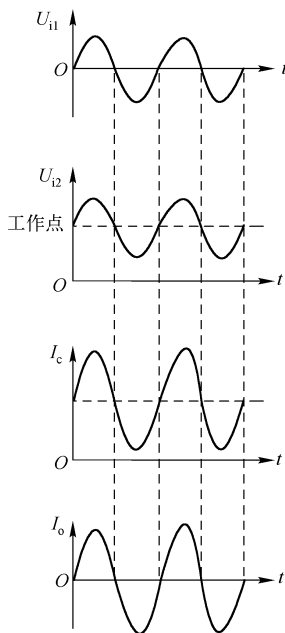


图 9-34 单管功率放大器各点波形

(2) 输出变压器的作用

输出变压器 T_2 具有阻抗匹配的作用。为了获得较大的输出功率，必须将扬声器 BL 较低的阻抗，转换为与 VT 的输出阻抗相匹配的最佳负载阻抗， T_2 承担了阻抗转换功能，如图 9-35 所示。从



T_2 初级（左边）看进去的阻抗 $R_L = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_{BL}$ 。由于 T_2 为降压变压器，初级线圈 N_1 圈数多，次级线圈 N_2 圈数少，即 $N_1 > N_2$ ，所以可以将扬声器 BL 的低阻抗转换为相匹配的高阻抗 R_L 。

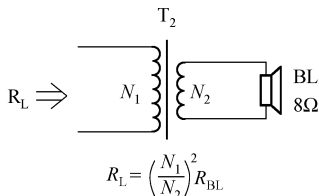


图 9-35 输出变压器的阻抗匹配作用



9.3.2 双管推挽功率放大器

双管推挽功率放大器采用两只功率放大管，分别放大正、负半周的信号，较大地提高了放大器的效率。根据晶体管的静态工作点是否为零，双管推挽功率放大器又可以分为乙类推挽功率放大器和甲乙类推挽功率放大器。

(1) 乙类推挽功率放大器

图 9-36 为乙类推挽功率放大器电路，是由两个相同的晶体管 VT_1 、 VT_2 组成的对称电路。输入变压器 T_1 的次级为中心抽头式对称输出，分别为 VT_1 、 VT_2 基极提供大小相等、相位相反的输入信号电压。输出变压器 T_2 的初级为中心抽头对称式，将 VT_1 、 VT_2 的集电极电流合成后输出。

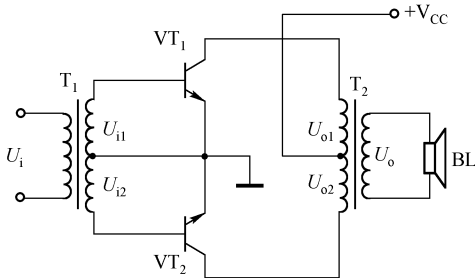


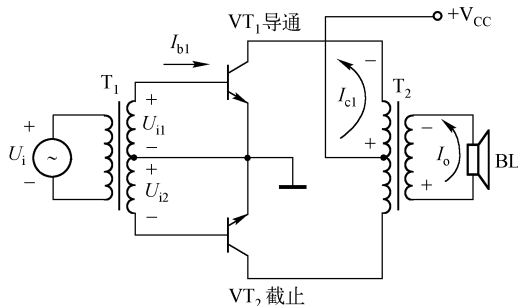
图 9-36 乙类推挽功率放大器电路



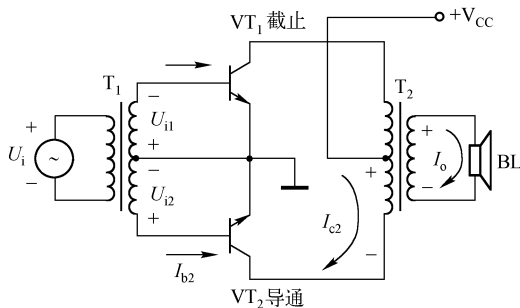
无输入信号电压时,晶体管 VT_1 、 VT_2 均因无基极偏置电压而截止。

当有输入信号电压 U_i 加到输入变压器 T_1 初级时,在 T_1 次级即产生大小相等、相位相反的两个交流电压 U_{i1} 和 U_{i2} ,使晶体管 VT_1 、 VT_2 轮流工作。

在输入信号电压 U_i 正半周时,次级交流电压 U_{i1} 和 U_{i2} 均为上正、下负。 U_{i1} 对于晶体管 VT_1 而言是正向偏置, VT_1 导通放大,其集电极电流 I_{c1} 通过输出变压器 T_2 ,在扬声器 BL 上产生由下向上的输出电流 I_o ,如图 9-37 (a) 所示。 U_{i2} 对于晶体管 VT_2 而言是反向偏置, VT_2 截止。



(a) 输入信号正半周时



(b) 输入信号负半周时

图 9-37 乙类推挽功率放大器工作原理



在输入信号电压 U_i 负半周时，次级交流电压 U_{i1} 和 U_{i2} 均为上负、下正。 U_{i1} 对于晶体管 VT_1 而言是反向偏置， VT_1 截止。 U_{i2} 对于晶体管 VT_2 而言是正向偏置， VT_2 导通放大，其集电极电流 I_{c2} 通过输出变压器 T_2 ，在扬声器 BL 上产生由上向下的输出电流 I_o ，如图 9-37 (b) 所示。

在输入信号电压 U_i 的一个周期内， VT_1 、 VT_2 虽然是轮流导通工作，但由于输出变压器 T_2 的合成作用，在扬声器 BL 上仍然可以得到一个完整的输出电流波形。各点工作波形如图 9-38 所示。

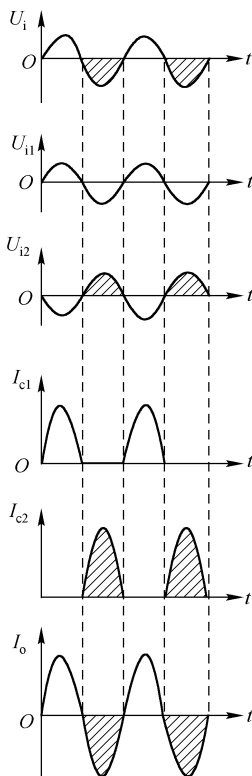


图 9-38 乙类推挽功率放大器各点工作波形



乙类推挽功率放大器的优点是效率很高，缺点是存在严重的交越失真。因此实际电路中往往采用改进后的甲乙类推挽功率放大器。

(2) 交越失真

产生交越失真的原因是因为晶体管 $U_b - I_c$ 曲线的起始部分呈弯曲状，如图 9-39 所示。当推挽功率放大器工作于乙类状态时，虽然输入信号电压 U_i 为正弦波，但由于两个晶体管集电极电流底部弯曲失真，结果合成的输出电流也就不是正弦波了。两个晶体管集电极电流合成波形过渡部位发生的这种失真，就称为交越失真。

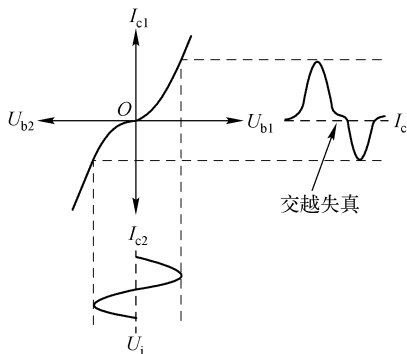


图 9-39 交越失真

(3) 甲乙类推挽功率放大器

甲乙类推挽功率放大器是在乙类推挽功率放大器的基础上改进的电路，它有效地克服了放大器的交越失真。

图 9-40 为双管推挽功率放大器的实用电路，工作于甲乙类状态。与如图 9-36 所示乙类推挽功率放大器电路相比，甲乙类推挽功率放大器电路仅增加 3 个电阻： R_1 、 R_2 为基极偏置电阻，为两个功率放大管提供一定的基极偏置电压，以减小和消除交越失真； R_3 为发射极电阻，利用 R_3 上的电流负反馈作用来稳定工作点。

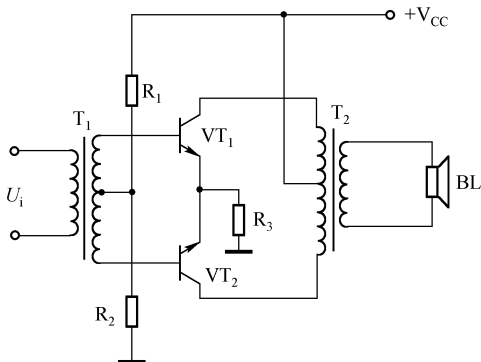


图 9-40 甲乙类推挽功率放大器

电路中加入上述 3 个电阻后，给晶体管 VT_1 和 VT_2 都加上一个小的正偏压，使其产生一个小的静态工作电流（即工作点），从而避开小电流时的曲线弯曲部分，也就消除了交越失真，波形如图 9-41 所示。

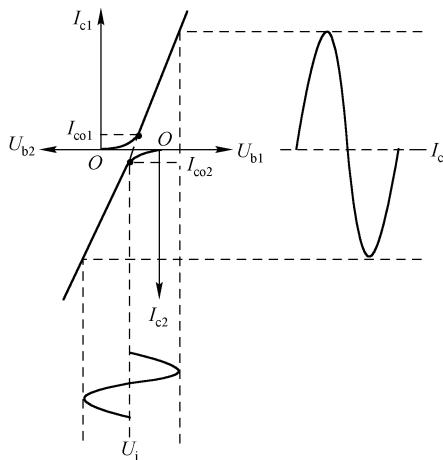


图 9-41 消除交越失真



9.3.3 OTL 功率放大器

OTL 功率放大器即无输出变压器功率放大器，由于电路中取消了输出变压器，因此彻底克服了输出变压器本身存在的体积大、损耗大、频响差等缺点，得到了广泛应用。

OTL 功率放大器有多种电路形式，如变压器倒相式 OTL 功率放大器、晶体管倒相式 OTL 功率放大器、互补对称式 OTL 功率放大器等。OTL 功率放大器一般采用单电源供电。

(1) 变压器倒相式 OTL 功率放大器

变压器倒相式 OTL 功率放大器的结构特点是采用输入变压器作信号倒相。图 9-42 为输入变压器倒相式 OTL 功率放大器电路。VT₁、VT₂ 为完全相同的两个功放晶体管。T 为输入变压器，具有两个独立的次级线圈，分别为 VT₁、VT₂ 提供大小相等、极性相反的基极信号电压。C 为输出耦合电容。

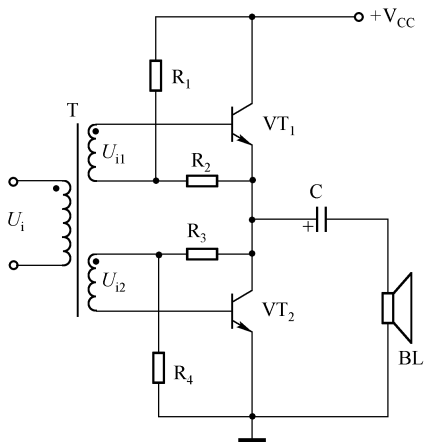


图 9-42 变压器倒相式 OTL 功率放大器电路

OTL 功率放大器直流回路如图 9-43 所示。对直流电源而言，两个晶体管 VT₁、VT₂ 是串联的，每个晶体管的 U_{ce} 为 $\frac{1}{2}V_{CC}$ 。



R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 为晶体管 VT_1 和 VT_2 提供基极偏置电压。

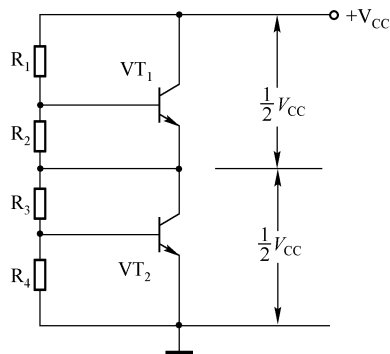


图 9-43 OTL 功率放大器直流回路

OTL 功率放大器交流回路如图 9-44 所示。当输入变压器 T 初级有输入信号电压 U_i 时，在其两个次级线圈上感应出两个极性相反的基极信号电压 U_{i1} 和 U_{i2} 。

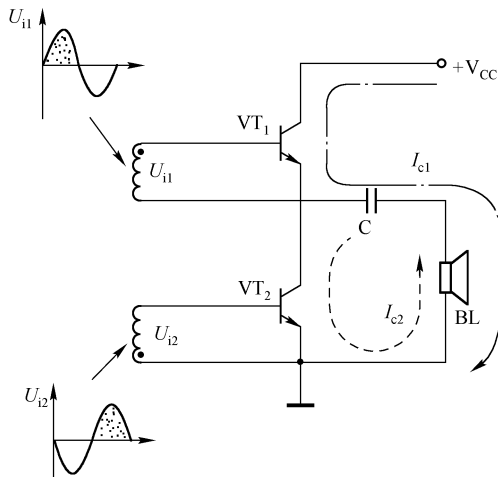


图 9-44 OTL 功率放大器交流回路

在输入信号电压 U_i 正半周时，基极信号电压 U_{i1} 为正极性，功放管 VT_1 导通；而基极信号电压 U_{i2} 为负极性，功放管 VT_2 截



止。这时，输出耦合电容 C 通过 VT_1 经扬声器 BL 充电，充电电流 I_{c1} 如点画线所示。

在输入信号电压 U_i 负半周时，基极信号电压 U_{i1} 为负极性， VT_1 截止；而基极信号电压 U_{i2} 为正极性， VT_2 导通。这时，输出耦合电容 C 通过 VT_2 经扬声器 BL 放电，放电电流 I_{c2} 如虚线所示。

输出耦合电容 C 的充电电流和放电电流在扬声器 BL 上的方向相反。正是利用电容量很大耦合电容 C 的充、放电，最终在扬声器 BL 上合成一个完整的信号波形。

(2) 晶体管倒相式 OTL 功率放大器

晶体管倒相式 OTL 功率放大器的结构特点是利用晶体管对输入信号进行倒相。图 9-45 为晶体管倒相式 OTL 功率放大器电路， VT_1 为倒相晶体管， C_1 为输入耦合电容， C_4 为输出耦合电容。

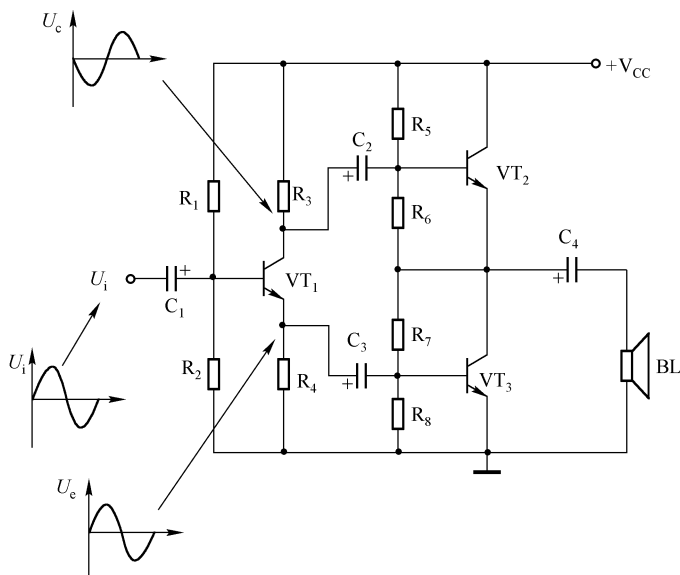


图 9-45 晶体管倒相式 OTL 功率放大器电路



晶体管倒相是基于晶体管集电极与发射极输出电压相位相反的原理,通过适当选取集电极电阻 R_3 、发射极电阻 R_4 的阻值,使 VT_1 集电极与发射极输出的电压大小相等,从而分别为功放管 VT_2 、 VT_3 提供大小相等、极性相反的基极信号电压。 C_2 、 C_3 为隔直流耦合电容。晶体管倒相式 OTL 功率放大器连输入变压器也取消了,使得功率放大器的质量指标得到进一步提高。

当输入信号电压 U_i 经输入电容 C_1 耦合至倒相晶体管 VT_1 基极时,在 VT_1 集电极和发射极便得到极性相反的两个电压信号。其中,集电极电压 U_c 与 U_i 反相,发射极电压 U_e 与 U_i 同相,使功放管 VT_2 、 VT_3 轮流导通工作,并通过输出耦合电容 C_4 的充、放电在扬声器 BL 上合成完整的输出信号。

(3) 互补对称式 OTL 功率放大器

互补对称式 OTL 功率放大器的结构特点是采用两个导电极性相反的功放管,因此只需要相同的一个基极信号电压即可。

图 9-46 为互补对称式 OTL 功率放大器电路,功放管 VT_2 为 NPN 型晶体管, VT_3 为 PNP 型晶体管。推动级 VT_1 集电极输出电压 U_{c1} 即为 VT_2 和 VT_3 的基极信号电压。

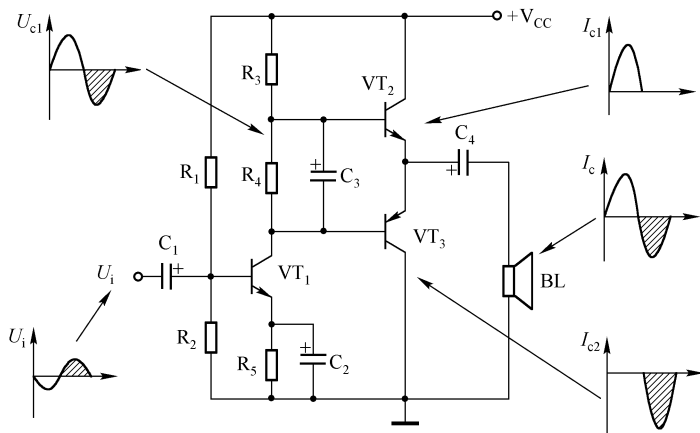


图 9-46 互补对称式 OTL 功率放大器电路



电路工作过程是：在 U_{e1} 正半周时，NPN 管 VT_2 导通，在 U_{e1} 负半周时，PNP 管 VT_3 导通，通过输出耦合电容 C_4 在扬声器 BL 上合成一个完整的信号波形。 VT_1 的集电极电阻 R_3 、 R_4 同时为 VT_2 、 VT_3 提供基极偏置电压。

为了提高输出功率，功放管可以采用复合管的形式。图 9-47 为采用复合管的互补对称式 OTL 功率放大器电路。由于功放管采用复合管，可以较方便地解决 NPN 大功率管与 PNP 大功率管的配对问题，并易于做成更大功率的功率放大器。

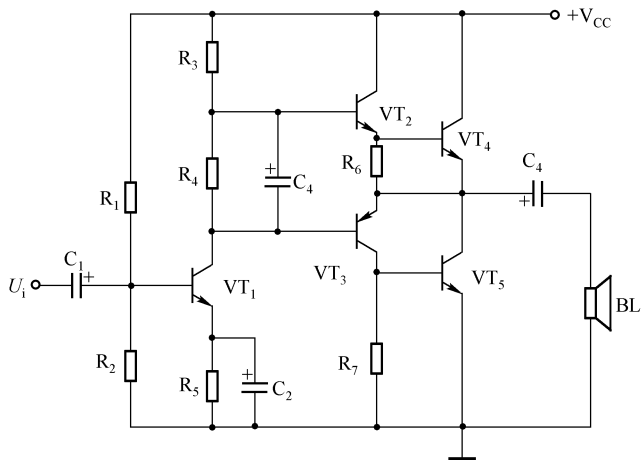


图 9-47 采用复合管的互补对称式 OTL 功率放大器电路

复合管可以由两个导电极性相同的晶体管组成，也可以由两个导电极性不同的晶体管组成。两个晶体管组成复合管时，其导电极性由第一个晶体管决定。

图 9-48 (a) 为两个 NPN 晶体管组成的复合管，等效为一个 NPN 型晶体管。如图 9-47 所示电路中的 VT_2 、 VT_4 就是这样的复合管。

图 9-48 (b) 为一个 PNP 晶体管和一个 NPN 晶体管组成的复合管，等效为一个 PNP 型晶体管。如图 9-47 所示电路中的



VT_3 、 VT_5 就是这样的复合管。

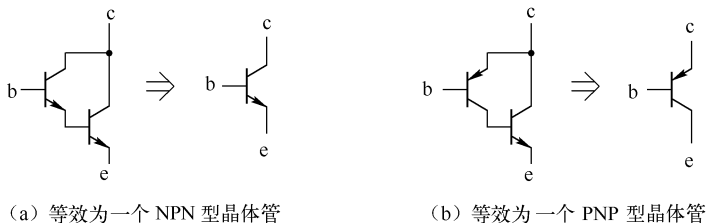


图 9-48 复合管的结构形式

9.3.4 OCL 功率放大器

OCL 功率放大器即无输出电容器功率放大器。OCL 功率放大器采用对称的正、负双电源供电，功放管 VT_4 、 VT_5 的连接点（中点）的静态电位为 $0V$ ，为取消输出耦合电容创造条件。由于没有输出耦合电容，使得放大器的频响等指标比 OTL 电路进一步提高。OCL 电路在集成功率放大器中广泛采用。

OCL 功率放大器电路如图 9-49 所示。 VT_1 为推动级放大晶体管。 VT_2 与 VT_4 组成 NPN 型复合管， VT_3 与 VT_5 组成 PNP 型复合管，承担功率放大任务。 R_1 、 R_2 为 VT_1 的基极偏置电阻， R_5 为 VT_1 的发射极电阻，用于稳定工作点。 R_3 、 R_4 既是 VT_1 的集电极负载电阻，同时又是两对复合功放管的基极偏置电阻。

OCL 功放电路工作原理为：输入信号 U_i 经 VT_1 放大后，从其集电极输出推动电压 U_{c1} 。在 U_{c1} 正半周时， VT_2 、 VT_4 导通，电流 I_{c4} 由正电源（ $+V_{CC}$ ）经功放管 VT_4 、扬声器 BL 到地，如图 9-49 所示的点画线。在 U_{c1} 负半周时， VT_3 、 VT_5 导通，电流 I_{c5} 由地经扬声器 BL、功放管 VT_5 到负电源（ $-V_{SS}$ ），如图 9-49 所示的虚线。在扬声器 BL 上即可合成一个完整的波形。

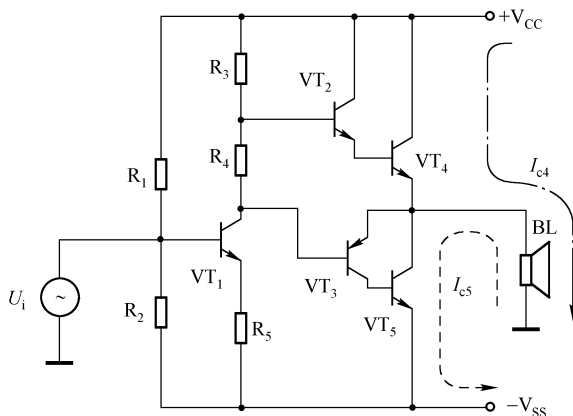


图 9-49 OCL 功率放大器电路



9.3.5 BTL 功率放大器

BTL 功率放大器即桥式推挽功率放大器。其突出优点是可在较低的电源电压下获得较大的输出功率。

BTL 功率放大器由两个相同的功放集成电路 IC_1 和 IC_2 组成。 IC_1 和 IC_2 的输入端分别接入大小相等、相位相反的输入信号 U_{i1} 与 U_{i2} ，扬声器 BL 接在两个功放电路的输出端 U_{o1} 与 U_{o2} 之间，如图 9-50 所示。

在输入信号的第一个半周： U_{i1} 为正半周信号，经 IC_1 放大后输出正电压，输出电压 U_{o1} 峰值可达 $+U$ ； U_{i2} 为负半周信号，经 IC_2 放大后输出负电压，输出电压 U_{o2} 峰值可达 $-U$ ；输出电流 I_o 由 U_{o1} 经扬声器 BL 流向 U_{o2} ，如图 9-50 所示的虚线。扬声器 BL 上得到的信号电压为 $+U - (-U) = 2U$ ，是单个功放电路 IC_1 或 IC_2 输出电压的 2 倍。

在输入信号的第二个半周： U_{i1} 为负半周信号，经 IC_1 放大后输出负电压，输出电压 U_{o1} 峰值可达 $-U$ ； U_{i2} 为正半周信号，经 IC_2 放大后输出正电压，输出电压 U_{o2} 峰值可达 $+U$ ；输出电流 I_o



由 U_{o2} 经扬声器 BL 流向 U_{o1} ，如图 9-50 所示的点画线。扬声器 BL 上得到的信号电压仍为 $2U$ 。因此，在电源电压和负载阻抗相同的情况下，BTL 功率放大器的输出功率是 OTL 或 OCL 功率放大器的 4 倍。

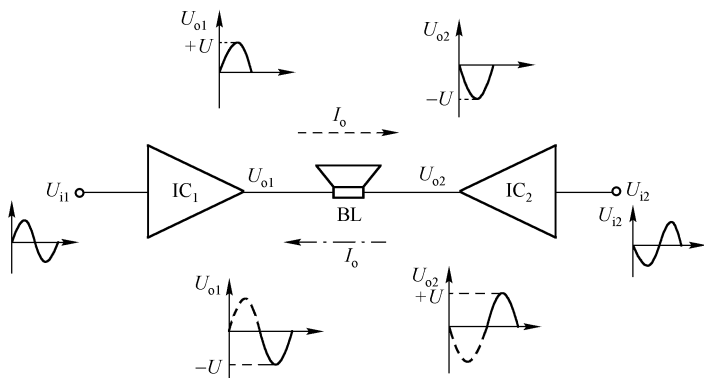


图 9-50 BTL 功率放大器原理

BTL 功率放大器需要两个大小相等、相位相反的输入信号 U_{i1} 与 U_{i2} ，根据获得这两个输入信号的方式，常用的 BTL 功率放大器电路可分为晶体管倒相式和自倒相式两种。

(1) 晶体管倒相式 BTL 功率放大器

晶体管倒相式 BTL 功率放大器电路如图 9-51 所示。VT₁ 为倒相晶体管，R₁、R₂ 是基极偏置电阻，R₃ 是集电极电阻，R₄ 是发射极电阻。输入信号电压 U_i 经 C₁ 耦合至 VT₁ 基极进行放大。因为晶体管集电极电压与发射极电压互为反相，而且 $R_3 = R_4$ ，所以从 VT₁ 集电极和发射极就可以得到大小相等、相位相反的两个信号电压 U_c 和 U_e ，分别作为 IC₁ 与 IC₂ 的输入信号电压。

集成功放 IC₁ 与 IC₂（均为 TDA2040）的外围电路完全相同，它们一起组成 BTL 功放电路，采用 $\pm 16V$ 双电源工作，输出功率为 30W ($R_{BL} = 8\Omega$)。VT₁ 输出的大小相等、相位相反的两个信号电压 U_c 和 U_e ，分别经 C₂、C₃ 耦合至 IC₁、IC₂ 进行功率放



大, 扬声器 BL 接在 IC₁ 输出端与 IC₂ 输出端之间。R₇、R₆、C₄ 为 IC₁ 的负反馈网络, R₁₁、R₁₀、C₅ 为 IC₂ 的负反馈网络, 它们决定放大器的电压增益。该电路电压增益为 30dB (放大倍数约为 32 倍)。

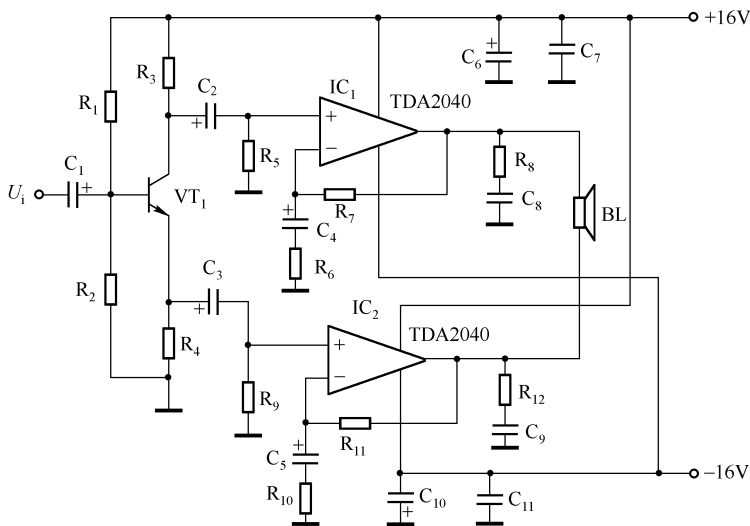


图 9-51 晶体管倒相式 BTL 功率放大器电路

(2) 自倒相式 BTL 功率放大器

自倒相式 BTL 功率放大器电路如图 9-52 所示。由两块功放集成电路 TDA2040 组成, 采用 $\pm 16\text{V}$ 双电源工作, 电压增益为 30dB (放大倍数为 32 倍), 输出功率为 30W ($R_{\text{BL}} = 8\Omega$)。

自倒相式 BTL 功率放大器不需要倒相晶体管, IC₂ 的输入信号不是直接取自放大器输入端的信号电压 U_i , 而是取自 IC₁ 的输出端。电路工作过程为: 信号电压 U_i 由 C₁ 耦合至 IC₁ 的同相输入端进行放大, IC₁ 输出端的输出电压在送给扬声器 BL 的同时, 经 R₇ 衰减后送入 IC₂ 的反相输入端, 这样在 IC₂ 的输出端即可得到一个相位相反的输出电压。只要 R₇ 的阻值适当, 就可以使 IC₂ 与 IC₁ 的输出电压大小相等且相位相反。R₃、R₂、C₂ 与 R₆、R₈、



C_5 分别是 IC_1 与 IC_2 的负反馈网络。 C_3 、 R_4 与 C_4 、 R_5 分别是 IC_1 与 IC_2 的输出端消振网络。

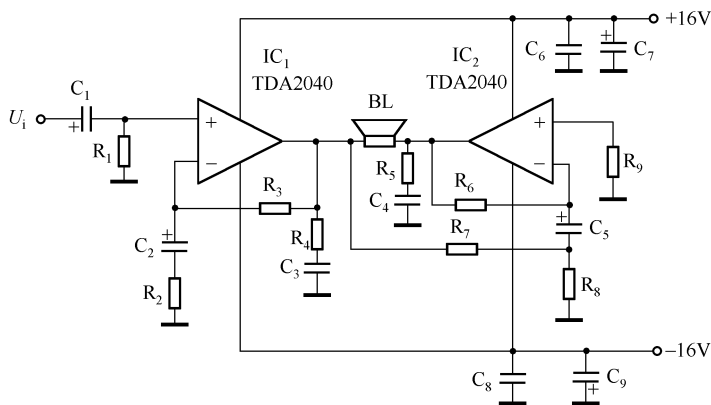


图 9-52 自倒相式 BTL 功率放大器电路



9.4 正弦波振荡器电路分析技巧

振荡器是一种不需要外加输入信号，而能够自己产生输出信号的电路。输出信号为正弦波的振荡器称为正弦波振荡器。正弦波振荡器由放大电路和反馈电路两部分组成。反馈电路将放大电路输出电压的一部分正反馈到放大电路的输入端，周而复始即形成振荡，如图 9-53 所示。

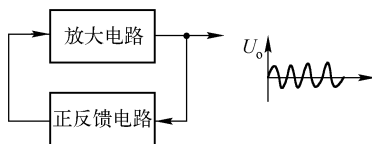


图 9-53 振荡器电路原理

正弦波振荡器有变压器耦合振荡器、三点式振荡器、晶体振



荡器、RC 振荡器等多种电路形式。

9.4.1 变压器耦合振荡器

变压器耦合振荡器的特点是输出电压较大,适用于频率较低的振荡电路。变压器耦合振荡器电路如图 9-54。LC 谐振回路接在晶体管 VT 的集电极,振荡信号通过变压器 T 耦合反馈到 VT 基极。

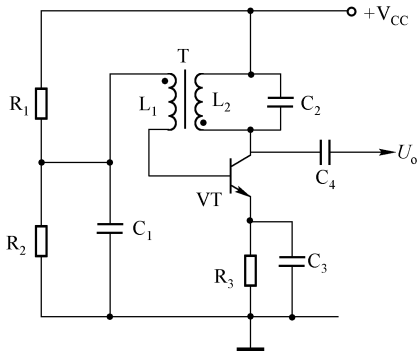


图 9-54 变压器耦合振荡器电路

正确接入变压器反馈线圈 L_1 与振荡线圈 L_2 之间的极性,即可保证振荡器的相位条件。 R_1 、 R_2 为 VT 提供合适的偏置电压,VT 有足够的电压增益,即可保证振荡器的振幅条件。满足相位、振幅两大条件,振荡器便能稳定地产生振荡,经 C_4 输出正弦波信号。

变压器耦合振荡器工作原理如图 9-55 所示。 L_2 与 C_2 组成的 LC 并联谐振回路作为晶体管 VT 的集电极负载,VT 的集电极输出电压通过变压器 T 的振荡线圈 L_2 耦合至反馈线圈 L_1 ,从而又反馈至 VT 基极作为输入电压。

由于晶体管 VT 的集电极电压与基极电压相位相反,所以变压器 T 的两个线圈 L_1 与 L_2 的同名端接法应相反,使变压器 T 同时起到倒相作用,将集电极输出电压倒相后反馈给基极,实现形成振荡所必需的正反馈。因为并联谐振回路在谐振时阻抗最大,且为纯电



阻, 所以只有谐振频率 f_0 能够满足相位条件时才能形成振荡, 这就是 LC 回路的选频作用。电路振荡频率 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ (Hz)。

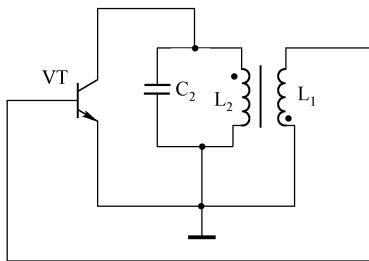


图 9-55 变压器耦合振荡器工作原理

9.4.2 三点式振荡器

三点式振荡器是指晶体管的 3 个电极直接与振荡回路的 3 个端点相连接而构成的振荡器, 如图 9-56 所示。在 3 个电抗中, X_{be} 、 X_{ce} 必须是相同性质的电抗 (同是电感或同是电容), X_{cb} 则必须是与前两者相反性质的电抗, 才能满足振荡的相位条件。

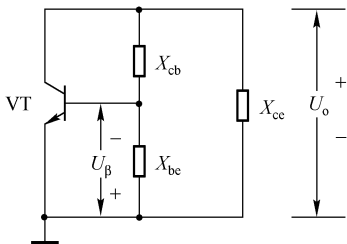


图 9-56 三点式振荡器原理

三点式振荡器有多种形式, 较常用的有电感三点式振荡器、电容三点式振荡器、改进型电容三点式振荡器等。

(1) 电感三点式振荡器

电感三点式振荡器电路如图 9-57 所示。 L_1 、 L_2 、 C_4 为构成



振荡回路的 3 个电抗。 R_1 、 R_2 为振荡晶体管 VT 的基极偏置电阻, R_3 为集电极电阻, R_4 为发射极电阻。 C_1 、 C_3 为基极、集电极耦合电容, C_2 为旁路电容。由于振荡回路的 3 个电抗中有两个是电感, 所以叫做电感三点式振荡器。

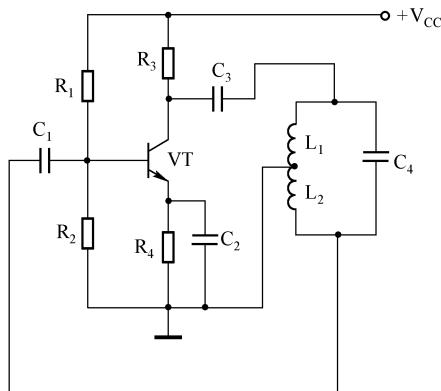
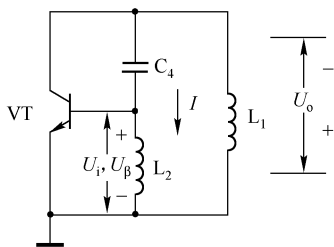
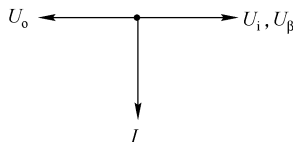


图 9-57 电感三点式振荡器电路

电感三点式振荡器是利用自耦变压器将输出电压 U_o 反馈到输入端的。其交流等效电路如图 9-58 (a) 所示。电感 L_1 和 L_2 可看成是一个自耦变压器, L_1 上的输出电压 U_o 通过自耦在 L_2 上产生反馈电压 U_β , U_β 与 U_o 反相而与 U_i 同相, 即正反馈。图 9-58 (b) 为其矢量图。



(a) 等效电路



(b) 矢量图

图 9-58 电感三点式振荡器等效电路

电感三点式振荡器的优点是容易起振, 波段频率范围较宽; 缺点是振荡输出电压波形不够好, 谐波较多。



(2) 电容三点式振荡器

电容三点式振荡器电路如图 9-59 所示。 L 、 C_3 、 C_4 为构成振荡回路的 3 个电抗。 R_1 、 R_2 为晶体管 VT 的基极偏置电阻， R_3 为集电极电阻， R_4 为发射极电阻。 C_1 为基极耦合电容， C_2 为旁路电容。由于振荡回路的 3 个电抗中有两个是电容，所以叫做电容三点式振荡器。

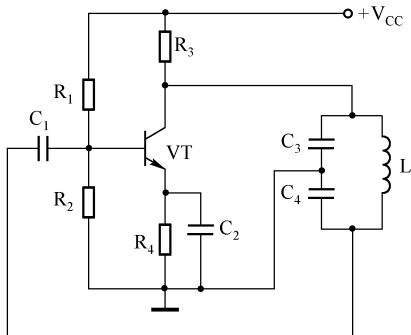


图 9-59 电容三点式振荡器电路

电容三点式振荡器的交流等效电路如图 9-60 所示。 C_3 上的输出电压 U_o 同时加在 L 、 C_4 支路上，由于电感上电流滞后电压 90° ，所以支路电流 I 比 U_o 滞后 90° 。而 I 流过电容 C_4 所产生的反馈电压 U_β 又比 I 滞后 90° ，即与输出电压 U_o 反相（相差 180° ）而与输入电压 U_i 同相，实现了正反馈。

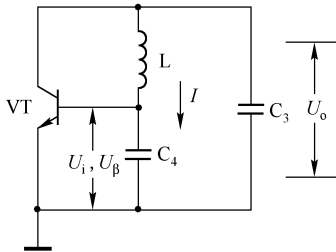


图 9-60 电容三点式振荡器的交流等效电路



电容三点式振荡器的优点是振荡输出电压波形好，振荡频率较稳定；缺点是不易起振，波段频率范围较窄。

(3) 改进型电容三点式振荡器

改进型电容三点式振荡器电路如图 9-61 所示。振荡回路由 L_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 构成。 R_1 、 R_2 为晶体管 VT 的基极偏置电阻， R_3 为集电极电阻， R_4 为发射极电阻。 C_1 为交流旁路电容。振荡电压由 L_1 耦合至 L_2 输出。

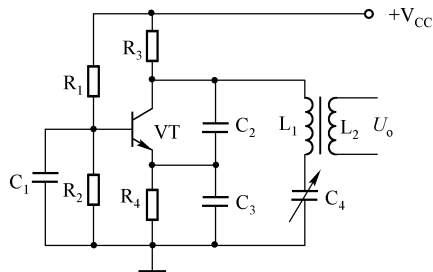


图 9-61 改进型电容三点式振荡器电路

改进型电容三点式振荡器的交流等效电路如图 9-62 所示。其特点是将大容量的 C_2 、 C_3 分别并联在 VT 的集电极 - 发射极、基极 - 发射极之间，在 L_1 支路中则串联一个小容量的电容器 C_4 。当 C_2 、 C_3 的容量远大于 C_4 的容量时，振荡频率主要由 L_1 和 C_4 决定，

$$f \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_4}}$$
。调节 C_4 的容量可在一定范围内改变振荡频率。

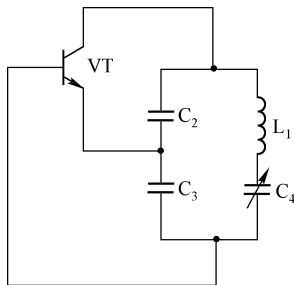


图 9-62 改进型三点式振荡器的交流等效电路



改进型电容三点式振荡器比普通的电容三点式振荡器具有更高的频率稳定度。

9.4.3 晶体振荡器

晶体具有压电效应，其固有谐振频率十分稳定，因此晶体振荡器具有非常高的频率稳定度。根据晶体在电路中的作用形式，常用的晶体振荡器可分为并联晶体振荡器和串联晶体振荡器两类。

(1) 并联晶体振荡器

并联晶体振荡器电路如图 9-63 所示。晶体 B 作为反馈元件，并联于晶体管 VT 的集电极与基极之间。 R_1 、 R_2 为晶体管 VT 的基极偏置电阻， R_3 为集电极电阻， R_4 为发射极电阻。 C_1 为基极旁路电容。

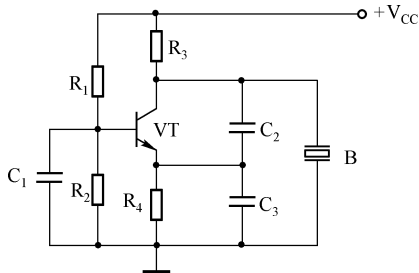


图 9-63 并联晶体振荡器电路

从如图 9-64 所示交流等效电路可见，这是一个电容三点式振荡器。晶体 B 在这里等效为一个电感元件使用，与振荡回路电容 C_2 、 C_3 一起组成并联谐振回路，共同决定电路的振荡频率。

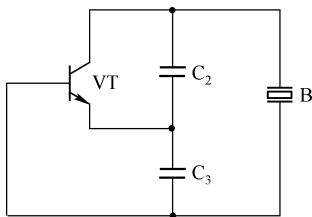


图 9-64 并联晶体振荡器的交流等效电路



并联晶体振荡器稳频原理如下：因为晶体的电抗曲线非常陡峭，可等效为一个随频率有很大变化的电感。当由于温度、分布电容等因素使振荡频率降低时，晶体的等效电感量就会迅速减小，迫使振荡频率回升；反之，则做反方向调整，最终使得振荡器具有很高的频率稳定度。

(2) 串联晶体振荡器

串联晶体振荡器电路如图 9-65 所示。晶体管 VT_1 、 VT_2 组成两级阻容耦合放大器。晶体 B 与 C_2 串联后作为两级放大器的反馈网络。 R_1 、 R_3 分别为 VT_1 、 VT_2 的基极偏置电阻， R_2 、 R_4 分别为 VT_1 、 VT_2 的集电极负载电阻。 C_1 为两管间的耦合电容， C_3 为振荡器输出耦合电容。

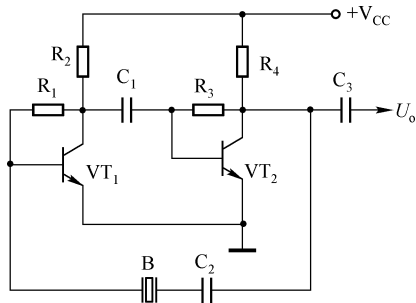


图 9-65 串联晶体振荡器电路

串联晶体振荡器的交流等效电路如图 9-66 所示。因为两级放大器的输出电压（ VT_2 的集电极电压）与输入电压（ VT_1 的基极电压）同相，晶体 B 在这里等效为一个纯电阻使用，将 VT_2 的集电极电压反馈到 VT_1 的基极，构成正反馈电路。电路振荡频率由晶体的固有串联谐振频率决定。

串联晶体振荡器稳频原理如下：因为晶体的固有谐振频率非常稳定，在反馈电路中起着带通滤波器的作用。当电路频率等于晶体的串联谐振频率时，晶体呈现为纯电阻，实现正反馈，电路振荡。当电路频率偏离晶体的串联谐振频率时，晶体将不再是纯电阻（呈现感抗或容抗），破坏了振荡的相位条件。因此，振荡



频率只能等于晶体的固有串联谐振频率。

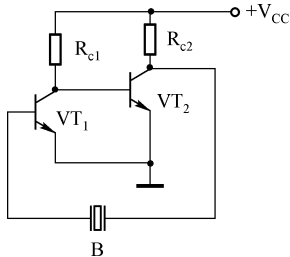


图 9-66 串联晶体振荡器的交流等效电路

9.4.4 RC 振荡器

RC 振荡器是以电阻、电容作为反馈和选频元件的振荡器，其突出特点是可以产生很低的振荡频率。音频振荡器常采用 RC 振荡器。RC 振荡器包括 RC 移相振荡器、RC 桥式振荡器等。

(1) RC 移相振荡器

RC 移相振荡器电路如图 9-67 所示。 $C_1 \sim C_3$ 、 $R_1 \sim R_3$ 组成移相网络。 R_4 是基极偏置电阻， R_5 是集电极电阻。 C_4 是输出耦合电容。由于晶体管 VT 的集电极输出电压与基极输入电压互为反相，两者相差 180° ，因此必须将集电极输出电压移相 180° （即再反相一次）后送至基极，才能使电路起振。

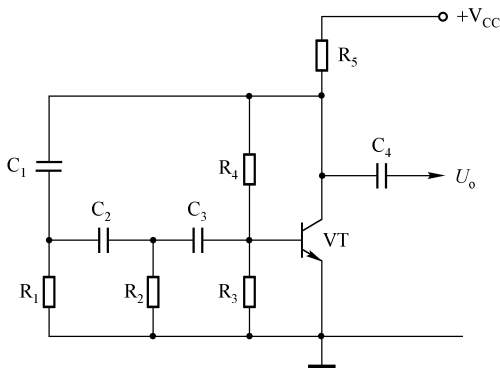


图 9-67 RC 移相振荡器电路



RC 网络具有移相作用。RC 移相网络是利用电容器上电流超前电压的特性工作的，如图 9-68 (a) 所示。通过电容 C 的电流 I_i 超前输入电压 U_i 一个相移角 φ ， I_i 在电阻 R 上的压降 U_R 即为输出电压 U_o ，所以输出电压 U_o 超前输入电压 U_i 一个相移角 φ 。 φ 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间，由组成移相网络的 R 、 C 的比值决定。其矢量图如图 9-68 (b) 所示。

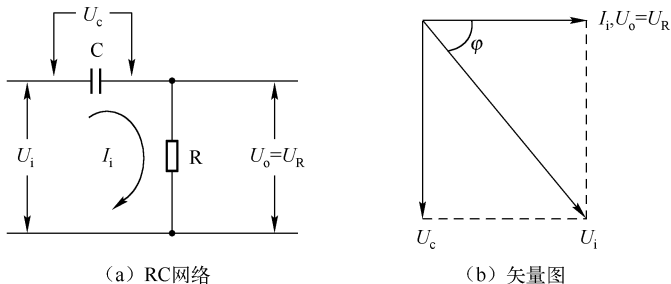


图 9-68 RC 网络的移相作用

当需要的相移角 φ 超过 90° 时，可用多节移相网络来解决。图 9-69 (a) 为三节 RC 移相网络，每节分别由 C_1 和 R_1 、 C_2 和 R_2 、 C_3 和 R_3 组成，适当选取 R 与 C 的值，使在特定频率下每节移相 60° ，三节便可实现移相 180° 。其矢量图如图 9-69 (b) 所示。

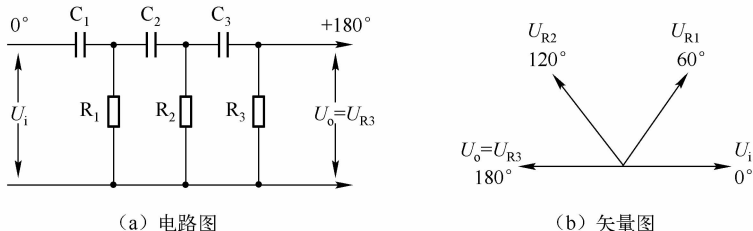


图 9-69 三节 RC 移相网络

将三节 RC 移相网络接于晶体管 VT 的集电极与基极之间，即可实现正反馈，满足了电路起振的相位条件，使电路起振。



RC 移相振荡器的特点是电路结构简单，但输出波形不够好。

(2) RC 桥式振荡器

RC 桥式振荡器又称为文氏电桥振荡器，电路如图 9-70 所示。 VT_1 、 VT_2 组成两级阻容耦合放大器。 R_1 、 C_1 串联及 R_2 、 C_2 并联共同组成正反馈网络，用以选频和产生振荡。 R_5 和 RT 组成负反馈网络，用以改善输出波形。 R_3 、 R_4 和 R_7 、 R_8 分别是 VT_1 、 VT_2 的基极偏置电阻。 C_7 是振荡电压输出耦合电容。

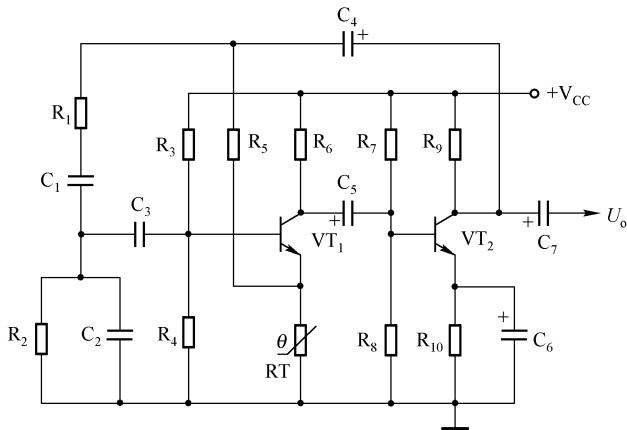


图 9-70 RC 桥式振荡器电路

正反馈网络和负反馈网络正好构成电桥电路，如图 9-71 所示。 VT_1 、 VT_2 组成相移角 $\varphi = 0^\circ$ 的放大器，电桥的 A、D 端接放大器输出端，B、E 端接放大器输入端。当信号频率等于 R_1 、 C_1 和 R_2 、 C_2 正反馈网络的谐振频率时，放大器输出电压 U_o 与反馈到输入端的电压 U_i 同相，电路振荡。

电桥 E-D 臂的 RT 是正温度系数热敏电阻，具有稳定振荡幅度的作用。当振荡增强时，流过热敏电阻 RT 的电流增大，导致温度升高、阻值增大，使负反馈增强、振荡减弱；反之，则使负反馈减弱、振荡增强，从而稳定了振幅。RC 桥式振荡器具有容易起振、输出波形较好、输出功率较大的特点，应用比较广泛。

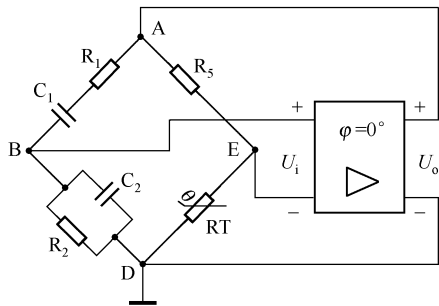


图 9-71 电桥电路



9.5 多谐振荡器电路分析技巧

多谐振荡器是脉冲和数字电路中常用的信号源之一，能够产生连续的脉冲方波。多谐振荡器可以由晶体管、数字电路或时基电路等构成。

9.5.1 门电路构成的多谐振荡器

门电路可以构成多谐振荡器，而且电路简单，工作稳定。特别是 CMOS 门电路构成的多谐振荡器，由于 CMOS 电路输入阻抗很高，因此无须用大容量的电容器，就能获得较大的时间常数，特别适用于制作低频和超低频振荡器。

(1) 非门多谐振荡器

两个非门可以构成多谐振荡器，电路如图 9-72 所示。 D_1 、 D_2 为非门， R 为定时电阻， C 为定时电容。B 点（ D_1 输出端）和 E 点（ D_2 输出端）分别输出互为反相的方波脉冲信号。

电路工作过程如下：当 E 点由 $E = 0$ 刚变为 $E = 1$ 时，由于电容 C 两端电压不能突变，所以 $A = 1$ ， $B = 0$ ，电容 C 开始经 R 充电，充电电流 $I_{C充}$ 如图 9-73 所示。随着电容 C 的充电，A 点电位逐渐下降。当 A 点电位降低至 D_1 的转换阈值时， D_1 输出端



(B 点) 由“0”变为“1”， D_2 输出端 (E 点) 由“1”变为“0”，实现电路的一次翻转。

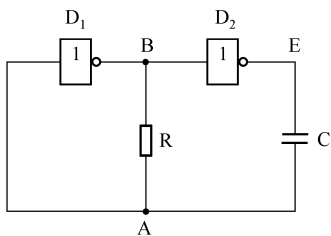


图 9-72 非门构成的多谐振荡器电路

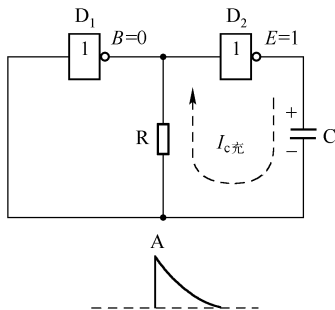


图 9-73 电容器充电

在电路刚翻转为 $E=0$ 时，同样由于电容 C 两端电压不能突变，致使 $A=0$ ， $B=1$ ，电容 C 开始经 R 放电，放电电流 $I_{c放}$ 如图 9-74 所示。随着电容 C 的放电， A 点电位逐渐上升。当 A 点电位升高至 D_1 的转换阈值时， D_1 输出端 (B 点) 又由“1”变为“0”， D_2 输出端 (E 点) 又由“0”变为“1”，电路再次翻转。

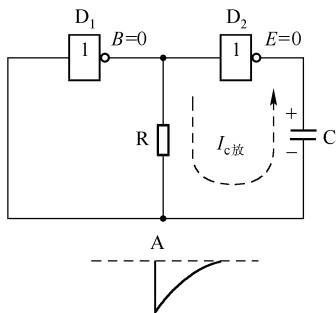


图 9-74 电容器放电

如此不断地自动翻转即形成自激振荡，振荡周期 $T = 1.4RC$ (s)。各点波形如图 9-75 所示。

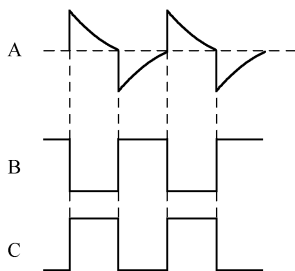


图 9-75 多谐振荡器各点波形

(2) 改进的多谐振荡器

图 9-76 为改进型多谐振荡器电路，在反相器 D_1 的输入端增加了补偿电阻 R_s ，可以有效地改善由于电源电压变化而引起的振荡频率不稳定的情况。当 R_s 的阻值远大于 R 的阻值（一般应使 $R_s = 10R$ 以上）时，电路振荡周期 $T = 2.2RC(s)$ 。

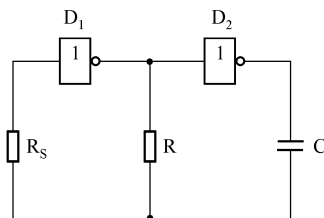


图 9-76 改进型多谐振荡器电路



9.5.2 时基电路构成的多谐振荡器

时基电路可以构成多谐振荡器，电路如图 9-77 所示。 R_1 、 R_2 、 C 组成定时网络，时基电路的置“1”输入端（2 脚）和置“0”输入端（6 脚）一起并接在定时电容 C 上端，放电端（7 脚）接在 R_1 与 R_2 之间，从时基电路的第 3 脚输出方波脉冲。

电路工作过程如下：刚接通电源时，因 C 上电压 $U_c = 0$ ，时基电路输出电压 $U_o = 1$ ，放电端（7 脚）截止，电源 $+V_{cc}$ 经 R_1 、 R_2 向 C 充电，如图 9-78 所示。

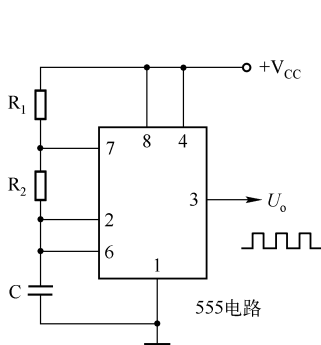
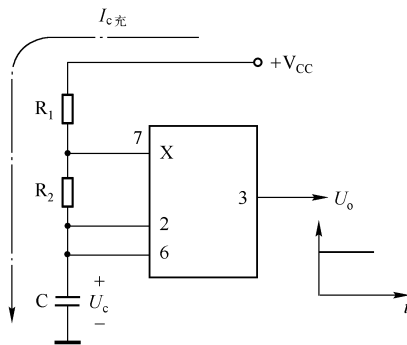

 图 9-77 时基电路构成的
多谐振荡器电路


图 9-78 充电过程

当 C 上电压 U_c 被充电到 $\frac{2}{3}V_{CC}$ 时, 时基电路翻转, $U_o = 0$, 放电端 (7 脚) 导通到地, C 上电压 U_c 经 R_2 和放电端放电, 如图 9-79 所示。

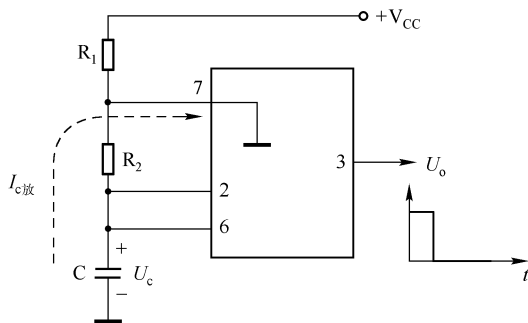


图 9-79 放电过程

当 C 上电压 U_c 由于放电下降到 $\frac{1}{3}V_{CC}$ 时, 时基电路再次翻转, 又使 $U_o = 1$, 从而开始新的一个周期。电路波形如图 9-80 所示, 振荡周期 $T = 0.7(R_1 + 2R_2)C$ 。

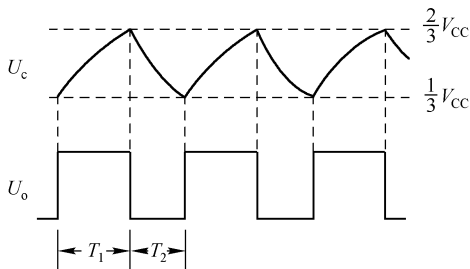


图 9-80 电路波形

9.5.3 单结晶体管构成的多谐振荡器

单结晶体管具有负阻特性，可以很方便地构成多谐振荡器，电路如图 9-81 所示。VT 为单结晶体管， R_1 是单结晶体管的发射极电阻， R_2 、 R_3 分别是单结晶体管的两个基极电阻， C 为定时电容。

单结晶体管多谐振荡器也是利用电容器的充、放电原理工作的。接通电源后，由于电容 C 上的电压不可能瞬间建立，单结晶体管 VT 处于截止状态，电源 $+V_{CC}$ 通过 R_1 向 C 充电，充电电流 $I_{C充}$ 如图 9-82 所示。

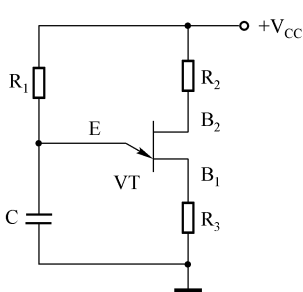
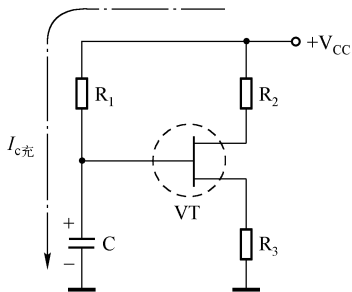
图 9-81 单结晶体管构成
多谐振荡器电路

图 9-82 充电电流

随着充电的进行，电容 C 上电压不断上升。当 C 上电压上升到单结晶体管 VT 的峰点电压 U_p 时，发射结等效二极管导通，



C 通过 VT 的发射极 - 第一基极和 R_3 放电, 放电电流 $I_{C放}$ 如图 9-83 所示。放电电流 $I_{C放}$ 在 R_3 上的压降形成窄脉冲。

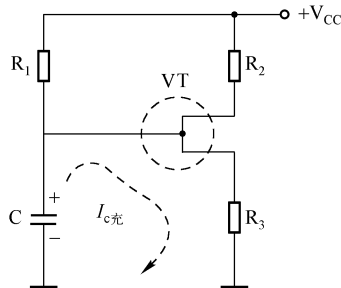


图 9-83 放电电流

当电容 C 上电压因放电下降至单结晶体管 VT 的谷点电压 U_{VT} 时, 单结晶体管截止, 又开始新一轮充、放电过程, 从而产生自激振荡, 振荡周期 $T \approx R_1 C \ln \frac{1}{1 - \eta}$ (s)。式中, η 为单结晶体管的分压比。

振荡信号可从单结晶体管的第一基极 B_1 或第二基极 B_2 输出, B_1 输出为连续窄脉冲, B_2 输出为占空比较大的方波脉冲, 波形如图 9-84 所示。

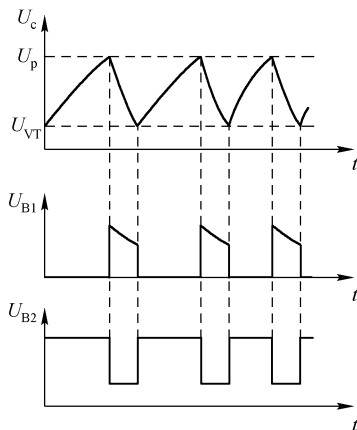


图 9-84 各点波形



9.5.4 施密特触发器构成的多谐振荡器

施密特触发器构成多谐振荡器时, 仅需外接一个电阻和一个电容, 电路如图 9-85 所示。电阻 R 和电容 C 组成定时电路, 电阻 R 跨接在施密特触发器 D 的输出端和输入端之间。

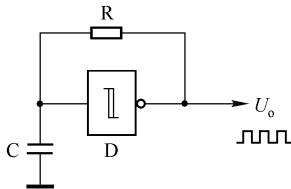


图 9-85 施密特触发器构成多谐振荡器电路

电路工作过程如下: 当施密特触发器 D 输出端为“1”时, 通过电阻 R 对电容 C 充电, C 上电压 (即 D 的输入端电压) 不断上升。当 C 上电压达到 D 的正向阈值电压 U_{T+} 时, 施密特触发器翻转, D 输出端由“1”变为“0”。这时, 电容 C 通过电阻 R 放电, C 上电压不断下降。

当 C 上电压下降至 D 的负向阈值电压 U_{T-} 时, 施密特触发器再次翻转, D 输出端又由“0”变为“1”, 如此周而复始形成振荡, 图 9-86 为其工作波形图。

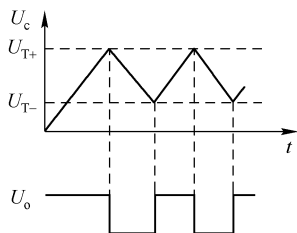


图 9-86 工作波形图



9.6 整流滤波电路分析技巧

整流滤波电路是常用的单元电路之一。整流滤波电路的主要



功能和作用是将交流电转变为直流电。使用最多的是电源整流电路，它将交流 220V 市电电源降压、整流、滤波为合适的直流电压作为电子电路的工作电源。整流滤波电路通常由整流电路和滤波电路两部分组成。

9.6.1 整流电路

整流电路是将交流电转换为直流电的电路。整流电路是利用晶体二极管等具有单向导电特性的电子器件进行工作的。整流电路可分为半波整流、全波整流、桥式整流等电路形式。

(1) 半波整流电路

半波整流电路是最简单、最基本的整流电路，如图 9-87 所示，由电源变压器 T、整流二极管 VD 组成， R_L 为负载电阻。电源变压器 T 的初级线圈 L_1 接交流电源电压 U_1 （通常为交流 220V 市电），经过变压器 T 的降压，在其次级线圈 L_2 两端得到所需要的交流电压 U_2 ，再经二极管 VD 整流成为直流电压 U_o 。

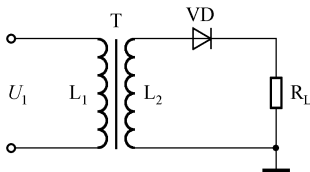


图 9-87 半波整流电路

半波整流电路工作过程如下：在交流电压 U_1 正半周时， U_2 的极性为上正、下负，如图 9-88 (a) 所示。我们知道，二极管具有单向导电性，即电流只能从正极流向负极。在 U_2 正半周时，整流二极管 VD 加的是正向电压，VD 导通，电流 I 由 U_2 “+” 经整流二极管 VD、负载电阻 R_L 回到 U_2 “-”，形成电流回路，并在 R_L 上产生电压降（即为输出电压 U_o ），极性为上正、下负。

在交流电压 U_1 负半周时， U_2 的极性为上负、下正，如图 9-88 (b) 所示。这时，整流二极管 VD 加的是反向电压，VD 截



止, 电流 $I=0$, 负载电阻 R_L 上无电压降, 输出电压 $U_o=0$ 。

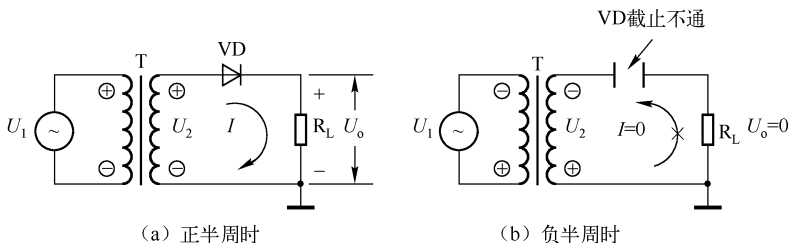


图 9-88 半波整流工作原理

半波整流电路工作波形如图 9-89 所示。从波形图可见, 半波整流电路只有在交流电压 U_2 正半周时才有输出电压 U_o , 负半周时无输出电压, 输出电压 U_o 的直流分量较少, 交流分量较多。由于只利用了交流电压 U_2 正弦波的一半, 所以半波整流电路的效率较低。

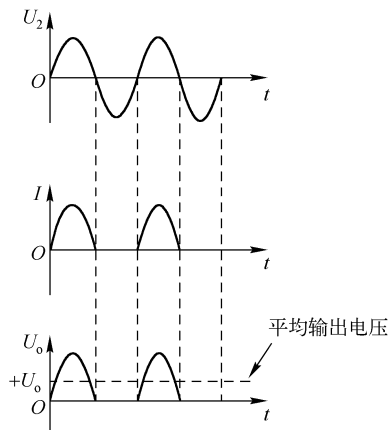


图 9-89 半波整流电路工作波形

(2) 全波整流电路

为了提高整流效率、减少输出电压 U_o 的脉动分量, 往往采用全波整流电路。全波整流电路实际上是两个半波整流电路的组合, 电路如图 9-90 所示。电源变压器 T 的次级绕组圈数为半波



整流时的两倍，且中心抽头，分为 L_2 与 L_3 两个部分。电路中采用两个整流二极管 VD_1 和 VD_2 。当电源变压器 T 初级线圈 L_1 接入交流电源 U_1 时，在次级线圈 L_2 与 L_3 上则分别产生 U_2 与 U_3 两个大小相等、相位相反的交流电压。

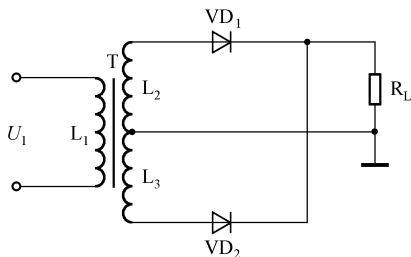


图 9-90 全波整流电路

全波整流电路工作过程如下：在交流电压 U_1 正半周时， U_2 与 U_3 均为上正、下负，如图 9-91 (a) 所示。 U_2 对于整流二极

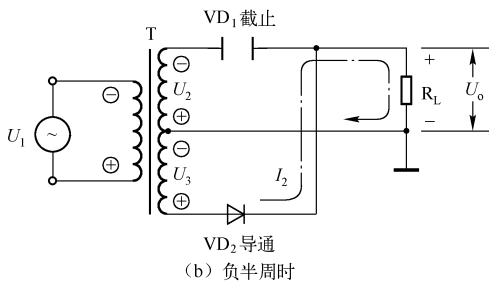
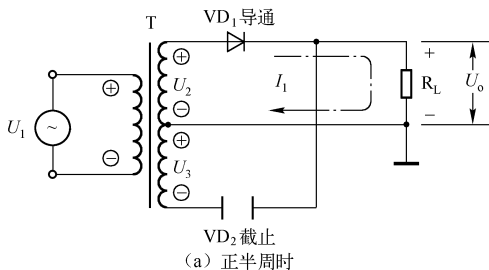


图 9-91 全波整流过程



管 VD_1 而言是正向电压, VD_1 导通, 电流 I_1 经 VD_1 流过负载电阻 R_L , R_L 上电压 U_o 为上正、下负。而 U_3 对于整流二极管 VD_2 而言是反向电压, 因此 VD_2 截止。

在交流电压 U_1 负半周时, U_2 与 U_3 均为上负、下正, 如图 9-91 (b) 所示。这时, U_2 对于 VD_1 而言是反向电压, 因此 VD_1 截止。 U_3 对于 VD_2 而言是正向电压, 因此 VD_2 导通, 电流 I_2 经 VD_2 流过负载电阻 R_L , R_L 上电压 U_o 仍为上正、下负。

综上所述, 在交流电压正半周时, 整流二极管 VD_1 导通, 由次级电压 U_2 向负载电阻 R_L 供电; 在交流电压负半周时, 整流二极管 VD_2 导通, 由次级电压 U_3 向负载电阻 R_L 供电; 由于 U_2 与 U_3 大小相等、相位相反, 所以交流电压的正、负半周均在负载电阻 R_L 上得到利用。

全波整流电路波形如图 9-92 所示。从波形图可见, 全波整流电路利用了输入交流电压的整个正弦波, 因此其输出电流和输出电压的脉动频率为半波整流时的两倍, 其中的直流分量也是半波整流时的两倍, 整流效率大大提高。

(3) 桥式整流电路

全波整流的另一电路形式是桥式整流, 电路如图 9-93 所示。桥式整流电路虽然需要使用 4 只整流二极管, 但是电源变压器次级绕组不必绕两倍圈数, 也不必中心抽头, 制作更为方便, 因此得到了非常广泛的应用。

桥式整流电路工作过程如下: 交流电压 U_1 正半周时, 电源变压器次级电压 U_2 的极性为上正、下负, 4 只整流二极管中, VD_1 、 VD_4 因所加电压为反向电压而截止; VD_2 、 VD_3 因所加电压为正向电压而导通, 电流 I_1 流过负载电阻 R_L , 如图 9-94 (a) 所示, 在 R_L 上产生电压降 (即为输出电压 U_o), 电压极性为上正、下负。

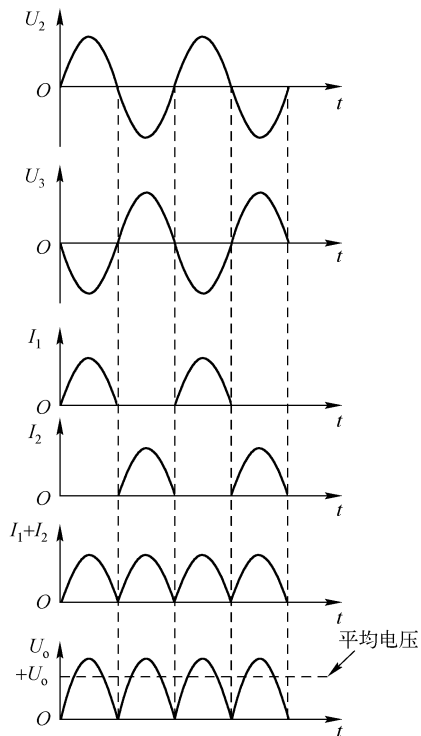


图 9-92 全波整流电路波形

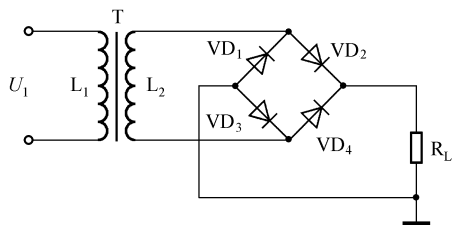
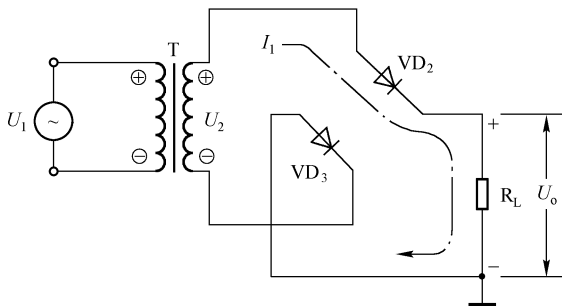
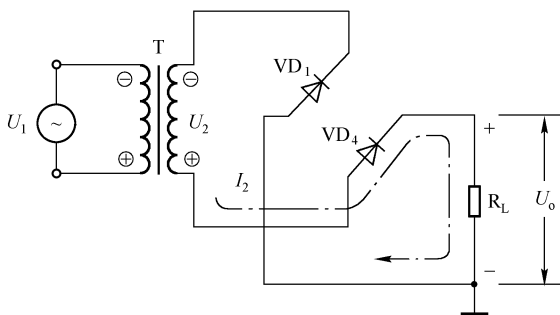


图 9-93 桥式整流电路



(a) 正半周时



(b) 负半周时

图 9-94 桥式整流过程

交流电压 U_1 负半周时, 电源变压器次级电压 U_2 的极性为上负、下正, 4 只整流二极管中, VD_2 、 VD_3 因所加电压为反向电压而截止; VD_1 、 VD_4 因所加电压为正向电压而导通, 电流流过负载电阻 R_L , I_2 如图 9-94 (b) 所示, 在 R_L 上产生电压降 (即为输出电压 U_o), 电压极性仍为上正、下负。

由于 4 只整流二极管巧妙地轮流工作, 使得交流电压的正、负半周均在负载电阻 R_L 上得到了利用, 从而实现了全波整流。其工作波形与如图 9-92 所示全波整流电路波形相同。

9.6.2 滤波电路

滤波电路是将整流出来的直流脉动电压中的交流成分滤除的



电路，以得到平滑实用的直流电压。滤波电路有许多种类，如电容滤波电路、电感滤波电路、倒 L 型 LC 滤波电路、 π 型 LC 滤波电路、RC 滤波电路等，如图 9-95 所示。

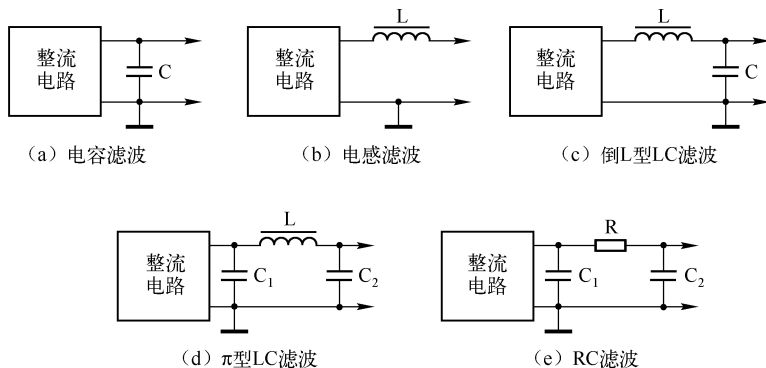


图 9-95 滤波电路的种类

由于电感元件体太笨重，而且在负载电流突然变化时会产生较大的感应电动势，易造成半导体管的损坏，所以在实际电路中通常使用电容滤波电路和 RC 滤波电路，在一些要求较高的电路中，还使用有源滤波电路。

(1) 电容滤波电路

电容滤波电路如图 9-96 所示。T 为电源变压器， $VD_1 \sim VD_4$ 为整流二极管，C 为滤波电容器， R_L 为负载电阻。

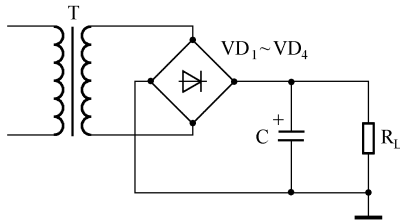


图 9-96 电容滤波电路

电容滤波电路是利用电容器的充、放电原理工作的。其工作过程可用如图 9-97 所示示意图进行说明。 U_o 为整流电路输出的



脉动电压， U_c 为滤波电路输出电压（即滤波电容 C 上电压）。

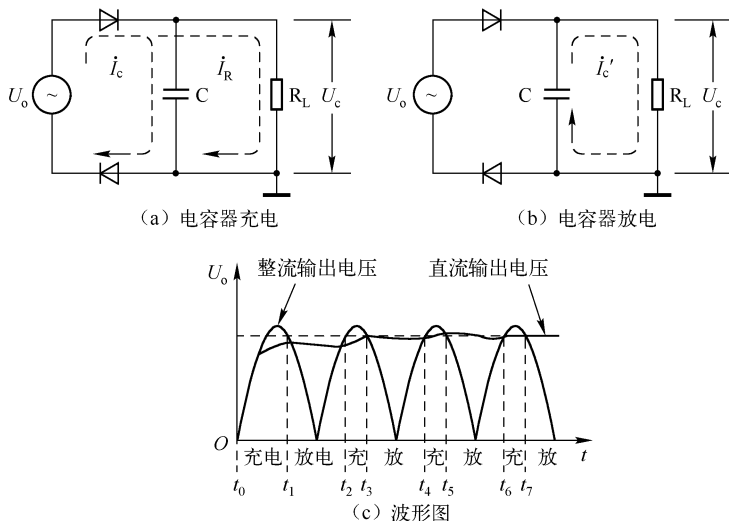


图 9-97 电容滤波电路工作过程

在 t_0 时刻， $U_c = 0$ 。 $t_0 \sim t_1$ 时刻，随着整流输出脉动电压 U_o 的上升， $U_o > U_c$ ，整流二极管导通， U_o 向滤波电容 C 充电，使 C 上的电压 U_c 迅速上升，充电电流为 i_c ；同时， U_o 向负载电阻 R_L 供电，供电电流为 i_R ；如图 9-97 (a) 所示。

到 t_1 时刻，C 上电压 $U_c = U_o$ ，充电停止。 $t_1 \sim t_2$ 时刻， U_o 处于下降和下一周期的上升阶段，但因为 $U_o < U_c$ ，整流二极管截止，无充电电流，C 向负载电阻 R_L 放电，放电电流为 i'_c ，如图 9-97 (b) 所示。

$t_2 \sim t_3$ 时刻， U_o 上升再次达到 $U_o > U_c$ ，整流二极管导通， U_o 又开始向 C 充电，补充 C 上已放掉的电荷。 $t_3 \sim t_4$ 时刻， U_o 又处于 $U_o < U_c$ 阶段，整流二极管截止，停止充电，C 又向负载电阻 R_L 放电。如此周而复始，其工作波形如图 9-97 (c) 所示。

从波形图可见，在起始的若干周期内，虽然滤波电容 C 时



而充电、时而放电，但其电压 U_c 的总趋势是上升的。经过若干周期以后，电路达到稳定状态，每个周期 C 的充、放电情况都相同，即 C 上充电得到的电荷刚好补充了上一次放电放掉的电荷。正是通过电容器 C 的充、放电，使得输出电压 U_c 保持基本恒定，成为波动较小的直流电。滤波电容 C 的容量越大，滤波效果相对就越好。

电容滤波电路虽然很简单，但是滤波效果不是很理想，输出电压中仍有交流分量，因此实际电路中使用较多的是 RC 滤波电路。

(2) RC 滤波电路

RC 滤波电路中采用了两个滤波电容 C_1 、 C_2 和一个滤波电阻 R_1 组成 π 形状，如图 9-98 所示。RC 滤波电路可看作是在 C_1 电容滤波电路的基础上，再经过 R_1 和 C_2 滤波，整个滤波电路的最终输出电压即为 C_2 上的电压 U_{c2} 。

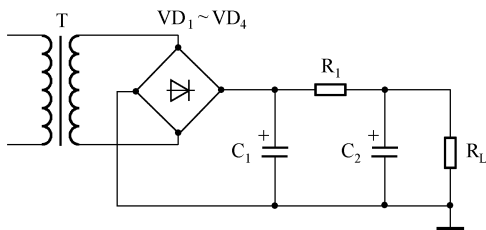


图 9-98 RC 滤波电路

R_1 和 C_2 可看成是一个分压器，如图 9-99 所示，输出电压 U_{c2} 等于 C_1 上电压 U_{c1} 经 R_1 与 C_2 分压后在 C_2 上所得到的电压。

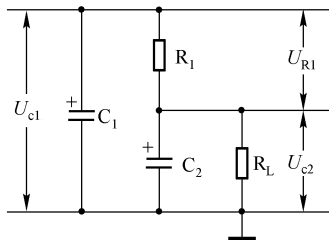


图 9-99 R_1 、 C_2 分压器



对于 C_1 初步滤波输出电压 U_{c1} 中的直流分量来说, C_2 的容抗极大, 几乎没有影响, 输出端直流电压的大小取决于滤波电阻 R_1 的阻值与负载电阻 R_L 的阻值比值, 只要 R_1 的阻值不是太大, 就可保证 R_L 得到绝大部分的直流输出电压。而对于 U_{c1} 中的交流分量来说, C_2 的容抗很小, 交流分量很大部分被旁路到地。因此, RC 滤波电路输出直流电压的纹波很小。

(3) 有源滤波电路

利用晶体管的直流放大作用可以构成有源滤波电路, 如图 9-100 所示。VT₁ 为有源滤波管。R₁ 是偏置电阻, 为 VT₁ 提供合适的偏置电流。C₂ 是基极旁路电容, 使 VT₁ 基极可靠地交流接地, 确保基极电流中无交流成分。C₃ 为输出端滤波电容。

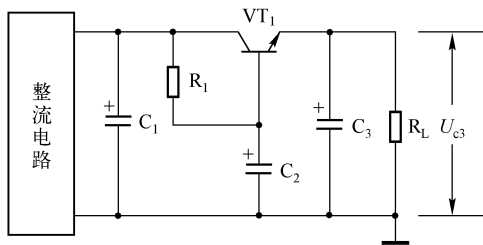


图 9-100 有源滤波电路

有源滤波电路工作原理是: 虽然整流电路输出并加在 VT₁ 集电极的是脉动直流电压, 其中既有直流分量也有交流分量, 但晶体管的集电极 - 发射极电流主要受基极电流的控制, 而受集电极电压变动的影响极微。由于 C₂ 的旁路滤波作用, VT₁ 的基极电流中几乎没有交流分量, 从而使 VT₁ 对交流呈现极高的阻抗, 在其输出端 (VT₁ 发射极) 得到的就是较纯净的直流电压 (U_{c3})。

因为晶体管的发射极电流是基极电流的 $(1 + \beta)$ 倍, 所以 C₂ 的作用相当于在输出端接入一个容量为 $(1 + \beta)$ 倍 C₂ 容量的大滤波电容。有源滤波电路具有直流压降小、滤波效果好的特点, 主要应用在滤波要求高的场合。



9.6.3 负压整流电路

负压整流电路是获得负压的整流电路。负压整流电路同样具有半波整流、全波整流、桥式整流等电路形式。

(1) 负压半波整流电路

负压半波整流电路如图 9-101 所示。与如图 9-87 所示正电压半波整流电路相比较，仅仅是将整流二极管 VD 反接即可。

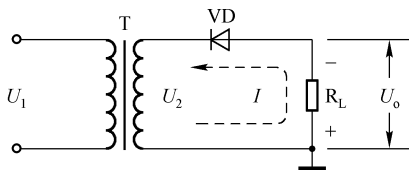


图 9-101 负压半波整流电路

由于整流二极管 VD 反接，因此只有在输入交流电压 U_2 负半周时，整流二极管 VD 才为正向使用而导通，电流 I 流向如图 9-101 所示中虚线，在负载电阻 R_L 上即可得到上负、下正的输出电压 U_o 。（即负电压输出）。而在输入交流电压 U_2 正半周时，整流二极管 VD 因所加电压为反向电压而截止，负载电阻 R_L 上因为无电流而无输出电压 U_o 。图 9-102 为负压半波整流电路波形图。

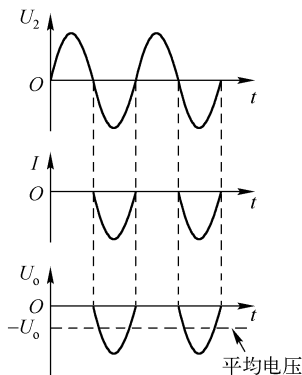


图 9-102 负压半波整流电路波形图



(2) 负压全波整流电路

将全波整流电路中的整流二极管 VD_1 和 VD_2 都反接，即为负压全波整流电路。交流电压 U_1 负半周时电流为 I_1 ，交流电压 U_1 正半周时电流为 I_2 ，如图 9-103 所示。负载电阻 R_L 上得到的输出电压 U_o 为负电压（上负、下正）。

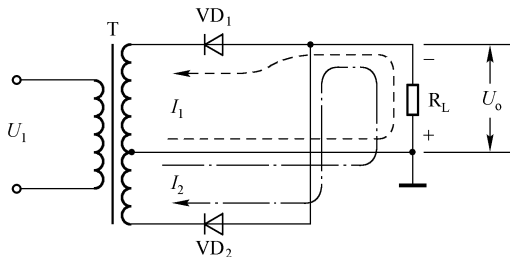


图 9-103 负压全波整流电路

(3) 负压桥式整流电路

将桥式整流电路中的 4 只整流二极管 VD_1 、 VD_2 、 VD_3 、 VD_4 全部反接，即为负压桥式整流电路，如图 9-104 所示。交流电压 U_2 正半周时，电流由 U_2 上端经 VD_1 、 R_L （从下到上）、 VD_4 回到 U_2 下端；交流电压 U_2 负半周时，电流由 U_2 下端经 VD_3 、 R_L （从下到上）、 VD_2 回到 U_2 上端；负载电阻 R_L 上得到的输出电压 U_o 为负电压（上负、下正）。图 9-105 为负压全波（含桥式）整流电路波形图。

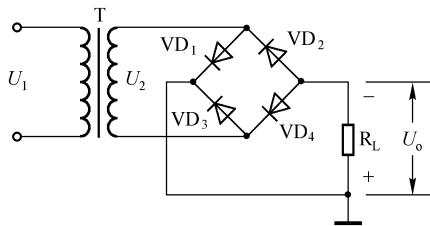


图 9-104 负压桥式整流电路

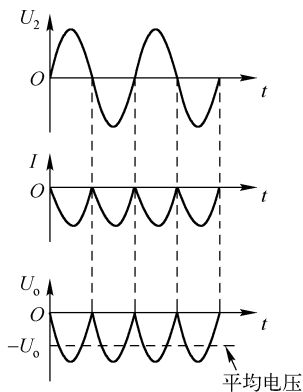


图 9-105 负压全波整流电路波形图

9.6.4 倍压整流电路

倍压整流电路可以使整流输出电压数倍于输入电压，在需要输出电压较高、输出电流较小的场合，可以采用倍压整流电路。

(1) 二倍压整流电路

图 9-106 为典型的二倍压整流电路，在空载时的输出直流电压是输入交流电压峰值的两倍。

倍压整流电路是利用电容器充、放电原理实现倍压输出的。在输入交流电压 U_2 负半周时，整流二极管 VD_1 导通， C_1 很快被充电至 U_2 峰值， C_1 上的电压 $U_{C1} = \sqrt{2} U_2$ ，极性为左负右正，如图 9-107 (a) 所示。

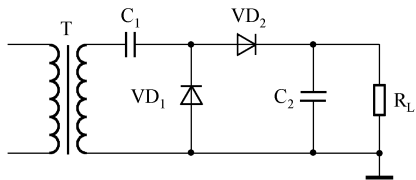


图 9-106 二倍压整流电路

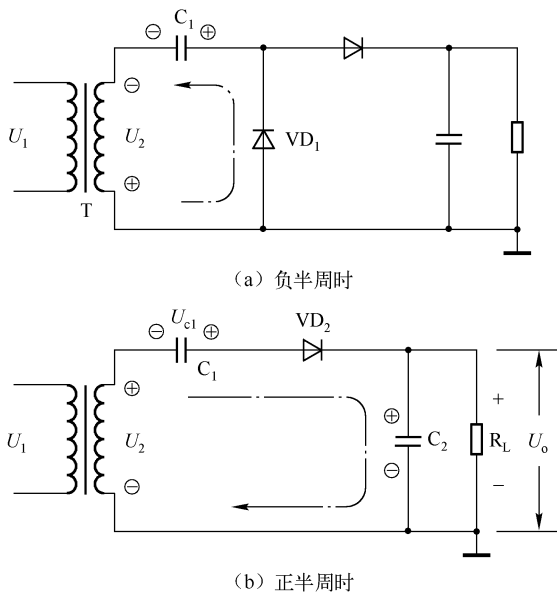


图 9-107 二倍压整流原理

在输入交流电压 U_2 正半周时，整流二极管 VD_1 截止、 VD_2 导通， U_2 与 C_1 上电压 U_{C1} 串联后经 VD_2 向 C_2 充电， C_2 上的电压等于 U_2 峰值与 C_1 上的电压 U_{C1} 之和，即 $U_{C2} = 2\sqrt{2}U_2$ ，极性为上正、下负，如图 9-107 (b) 所示。 U_{C2} 即为输出电压 U_o ，所以，负载电阻 R_L 上得到的输出直流电压 U_o 是 U_2 峰值的两倍。

(2) 多倍压整流电路

根据二倍压整流电路原理可以构成多倍压整流电路。一般来讲， n 倍压整流电路需要 n 个整流二极管和 n 个电容器。但是，倍压整流的倍数越高，电路的输出电流越小，即带负载能力越弱。

三倍压整流电路如图 9-108 所示，由 3 个整流二极管 $VD_1 \sim VD_3$ 和 3 个电容器 $C_1 \sim C_3$ 组成。在输入交流电压 U_2 的第一个半周（正半周）时， U_2 经 VD_1 对 C_1 充电至 $\sqrt{2}U_2$ ；在 U_2 的第二个半周（负半周）时， U_2 与 C_1 上的电压串联后经 VD_2 对 C_2 充电至



$2\sqrt{2}U_2$ ；在 U_2 的第三个半周（正半周）时， VD_3 导通使 C_3 也充电至 $2\sqrt{2}U_2$ 。因为输出电压 $U_o = U_{C1} + U_{C3} = 3\sqrt{2}U_2$ ，所以在负载电阻 R_L 上即可得到 3 倍于 U_2 峰值的电压。

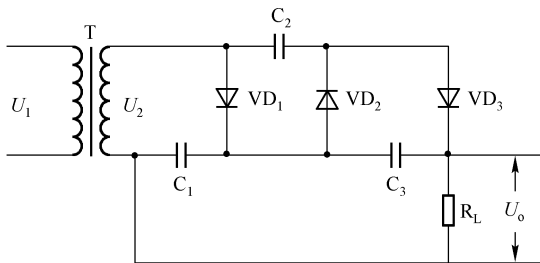


图 9-108 三倍压整流电路

四倍压整流电路如图 9-109 所示，由 4 个整流二极管 $VD_1 \sim VD_4$ 和 4 个电容器 $C_1 \sim C_4$ 组成，工作原理分析同三倍压整流电路。输出电压 $U_o = U_{C2} + U_{C4} = 4\sqrt{2}U_2$ ，在负载电阻 R_L 上可得到 4 倍于 U_2 峰值的电压。

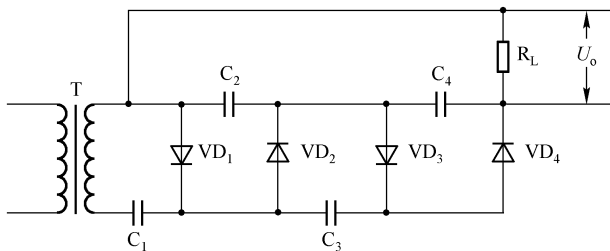


图 9-109 四倍压整流电路

按以上电路规律，还可以组成五倍压、六倍压甚至更多倍压的倍压整流电路。



9.7 稳压电路分析技巧

稳压电路的作用是稳定电源电路的输出电压。由于种种原因，交流电网的供电电压往往是不稳定的，因此整流滤波电路输



出的直流电压也就会不稳定。另外,由于整流滤波电路必然存在内阻,当负载电流发生变化时,输出电压也会受到影响而发生变化。为了得到稳定的直流电压,必须在整流滤波电路之后采用稳压电路。

9.7.1 简单稳压电路

半导体稳压二极管在反向击穿状态下,具有虽然电流在较大范围内变化,而其两端电压却基本不变的特性。利用稳压二极管的这一特性,可以组成简单稳压电路,如图9-110所示。稳压二极管VD与负载电阻 R_L 并联,VD上的电压即是输出电压 U_o , R_1 为限流电阻。稳压二极管工作于反向击穿状态,其反向击穿电压即是稳定电压 U_Z 。图9-111为稳压二极管特性曲线,在 U_Z 处,电流在较大范围变化时,电压基本不变。

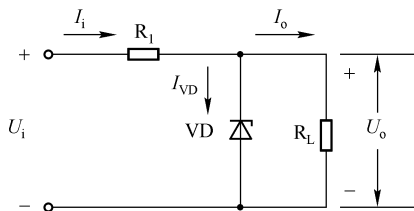


图9-110 简单稳压电路

简单稳压电路的特点是电路简单,但输出电压不可调、输出电流受稳压二极管的限制,仅适用于要求输出电流较小的场合。

(1) 输入电压变化时的稳压过程

当输入电压 U_i 因某种原因而上升时,必然造成输出电压 U_o 有所上升。但稳压二极管具有保持稳压值恒定的特性,因此使得流过稳压二极管VD的电流 I_{VD} 增大,也就使得输入电流 I_i 增大,导致限流电阻 R_1 上的电压降 U_{R1} 增大,迫使输出电压 U_o 回落,最终使输出电压 U_o 保持基本不变。电压上升时的稳压过程如图9-112所示。

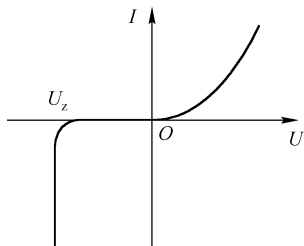


图 9-111 稳压二极管特性曲线

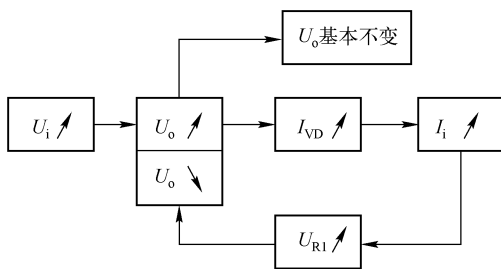


图 9-112 电压上升时的稳压过程

当输入电压 U_i 因某种原因而下降时，稳压过程与如图 9-112 所示相反。输出电压 U_o 有所下降，使流过稳压二极管 VD 的电流 I_{VD} 减小，输入电流 I_i 也随之减小， R_1 上电压降 U_{R1} 减小，迫使输出电压 U_o 回升，最终使输出电压 U_o 保持基本不变。

(2) 负载电流变化时的稳压过程

当负载电流 I_o 因某种原因而增大时，会使输出电压 U_o 有所下降，同样导致稳压二极管 VD 的电流 I_{VD} 减小，输入电流 I_i 也随之减小， R_1 上电压降 U_{R1} 减小，迫使输出电压 U_o 回升，最终使得输出电压 U_o 保持基本不变。图 9-113 为负载电流增大时的稳压过程。

当负载电流 I_o 因某种原因而减小时，电路做出与如图 9-113 所示相反的调控，最终使得输出电压 U_o 保持基本不变。

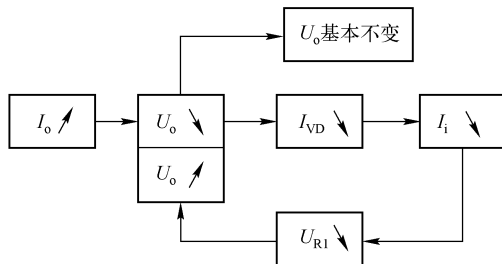


图 9-113 负载电流增大时的稳压过程

9.7.2 串联型稳压电路

串联型稳压电路如图 9-114 所示。晶体管 VT 为自动调整元件，由于调整元件串联在负载回路中，因此称为串联型稳压电路。VD 为稳压二极管，为调整管 VT 提供稳定的基极电压。 R_1 为稳压二极管的限流电阻， R_L 为负载电阻。 U_i 为输入电压。 U_o 为输出电压。 I_c 为输出电流。

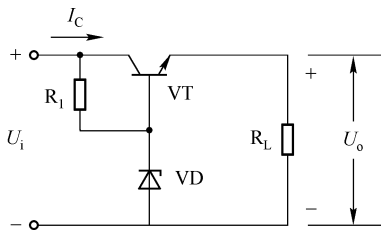


图 9-114 串联型稳压电路

串联型稳压电路稳压精度较高，可以输出较大的直流电流，还可以做到输出直流电压连续可调，得到了广泛的应用。

串联型稳压电路工作原理可用如图 9-115 所示说明。 R 为串联在负载回路中的可变电阻， R 上的电压降 U_R 与输出电压 U_o 之和等于输入电压 U_i 。如果输入电压 U_i 变大了，就将可变电阻 R 的阻值适当调大，使其电压降 U_R 增大，从而保持输出电压 U_o 不



变。如果输入电压 U_i 变小了, 就将 R 的阻值适当调小, 使其电压降 U_R 减小, 从而保持输出电压 U_o 不变。如果负载电阻 R_L 变化引起负载电流变化时, 也将 R 的阻值做适当调整, 使得输出电压 U_o 保持不变, 这样就达到了稳定输出电压的目的。

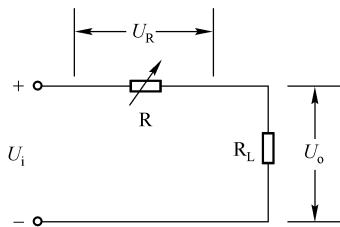


图 9-115 串联型稳压电路工作原理

当然, 在实际电路中, 不可能人工调节可变电阻 R 的阻值, 而是利用晶体管的集电极 - 发射极间的管压降作为可变电阻 R 来进行自动调节。该晶体管被称为调整管。

(1) 简单串联型稳压电路

在串联型稳压电路中, 调整管 VT 相当于一个可变电阻, 起到自动调整电压的作用, 如图 9-116。由于调整管 VT 的基极电压是由稳压二极管 VD 提供的恒定电压, 因此输出电压 U_o 的任何变化都将引起 VT 的基极 - 发射极间电压 U_{be} 的反向变化, 从而改变调整管 VT 的管压降 U_{ce} , 达到自动稳压的目的。

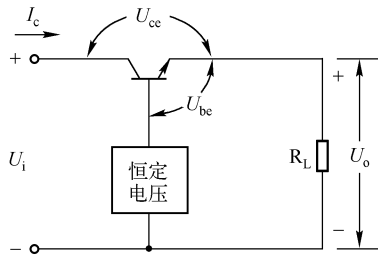


图 9-116 调整管的作用



当因为输入电压 U_i 上升或负载电阻 R_L 增大（即负载电流减小）造成输出电压 U_o 趋于上升时，调整管 VT 的发射极电压 U_e 也趋于上升（因为 $U_e = U_o$ ），而 VT 的基极电压被稳压二极管所恒定，所以 VT 的基极 - 发射极间电压 U_{be} 将下降，导致集电极电流 I_c 减小，管压降 U_{ce} 增大，迫使 U_o 回落，最终维持输出电压 U_o 的稳定。稳压过程如图 9-117 所示。

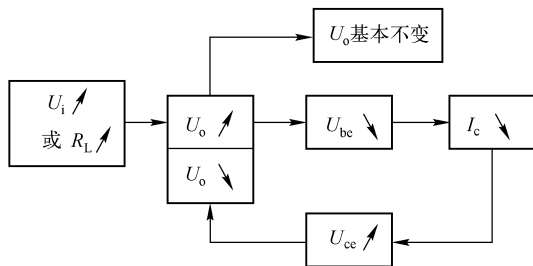


图 9-117 稳压过程

当因为输入电压 U_i 下降或负载电阻 R_L 减小（即负载电流增大）造成输出电压 U_o 趋于下降时，调整管 VT 的基极 - 发射极间电压 U_{be} 将上升，导致其集电极电流 I_c 增大，管压降 U_{ce} 减小，迫使 U_o 回升，从而保持输出电压 U_o 的稳定。电路的稳压调控过程与如图 9-117 所示相反。

（2）带放大环节的串联型稳压电路

为了进一步提高输出电压的稳定度，在实际应用中往往采用带有放大环节的串联型稳压电路，如图 9-118 所示。VT₁ 为调整管，其基极控制信号来自 VT₂ 集电极。VT₂ 等组成比较放大器，R₁ 为其集电极负载电阻。稳压二极管 VD 和 R₂ 构成基准电压，R₃、R₄ 组成取样电路。由于增加了比较放大器，所以该稳压电路的调节灵敏度更高，输出电压的稳定性更好。

图 9-119 为带放大环节的串联型稳压电路方框图。其基本工作原理是：取样电路将输出电压 U_o 按比例取出一部分，送到比较放大器与基准电压进行比较。如果两者有差值，则比较放大器便将差值放大后去控制调整管，使调整管反向变化来抵消输出电压的变化。

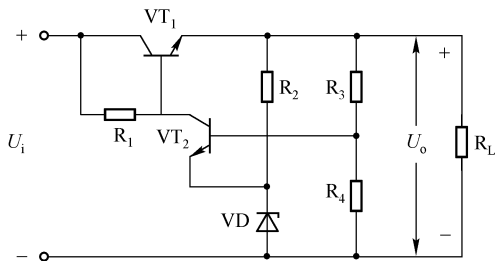


图 9-118 带放大环节的串联型稳压电路

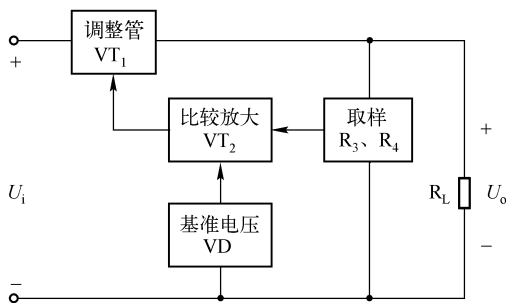


图 9-119 带放大环节的串联型稳压电路方框图

当输入电压 U_i 上升或负载电阻 R_L 变大（即负载电流减小）时，必然使输出电压 U_o 趋于上升，取样电压也按比例上升。取样电压送入 VT_2 基极，使 VT_2 因基极电压升高（其发射极电压被稳压二极管所恒定）而集电极电流增大、集电极电压下降。因为 VT_2 集电极电压就是 VT_1 的基极电压，调整管 VT_1 因其基极电压下降而导致管压降增大，迫使 U_o 回落，最终使输出电压 U_o 保持稳定。稳压调整过程如图 9-120 所示。

当输入电压 U_i 下降或负载电阻 R_L 变小（即负载电流增大）时，必然使输出电压 U_o 趋于下降，取样电压也按比例下降，经 VT_2 放大后，使调整管 VT_1 因其基极电压上升而导致管压降减小，迫使 U_o 回升，最终保持输出电压 U_o 稳定。稳压调整过程与如图 9-120 所示相反。

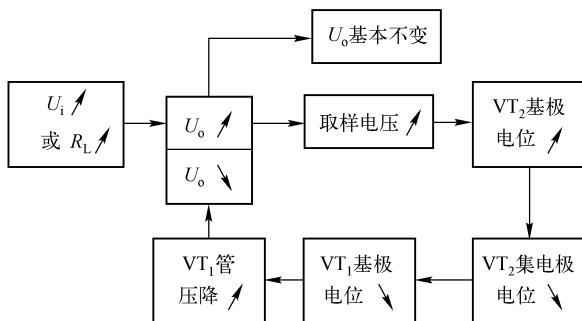


图 9-120 带放大环节的串联型稳压调整过程

改变取样电路的分压比，即可改变稳压电路输出电压的大小，因此该电路可以方便地构成输出电压连续可调的串联型稳压电路。如图 9-121 所示，取样电路由电阻 R_3 、 R_4 和电位器 RP 组成。当调节电位器 RP 的动臂向下移动时，取样比减小，输出电压 U_o 增大；当调节电位器 RP 的动臂向上移动时，取样比增大，输出电压 U_o 减小。

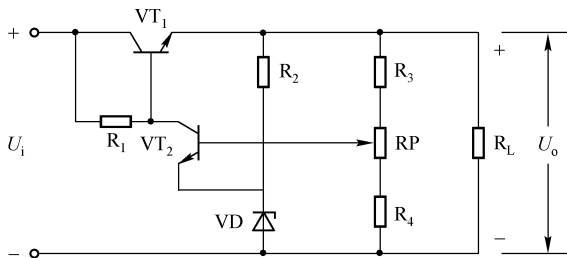


图 9-121 输出电压可调的串联型稳压电路



9.7.3 采用集成稳压器的稳压电路

采用集成稳压器构成稳压电路，具有电路简单、稳定度高、输出电流大、保护电路完善的特点，因此在实际电路中得到了非常广泛的应用。



(1) 固定输出电压的稳压电路

输出电压为固定正电压的稳压电路如图 9-122 所示。集成电路 IC 为 7800 系列固定正输出集成稳压器。 C_1 、 C_2 为输入端滤波电容， C_3 为输出端滤波电容。 R_L 为负载电阻。稳压电路的输出电压 U_o 由所选用的集成稳压器 $78 \times \times$ 的输出电压决定，如 IC 选用 7812，则电路输出电压为 $+12V$ 。由于集成稳压器可靠工作时要求有一定的压差，因此输入电压 U_i 至少应比输出电压 U_o 高 $2.5V$ 。

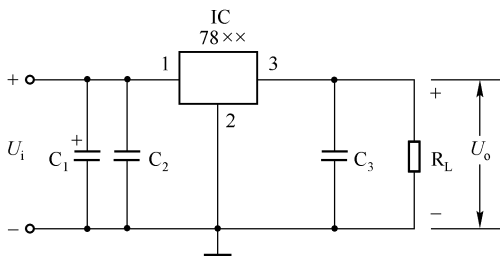


图 9-122 输出电压为固定正电压的稳压电路

输出电压为固定负电压的稳压电路如图 9-123 所示。电路结构与固定正输出稳压电路相似，仅仅是集成电路 IC 采用 7900 系列固定负输出集成稳压器。该电路输出电压 U_o 由所选用的集成稳压器 $79 \times \times$ 的输出电压所决定。

同时利用配对的 7800 系列与 7900 系列集成稳压器，可以组成具有正、负对称输出电压的稳压电路。如图 9-124 所示， IC_1 为 7800 系列固定正输出集成稳压器， IC_2 为 7900 系列固定负输出集成稳压器，且 IC_1 与 IC_2 输出电压相同。该稳压电路提供的正、负对称输出的稳定电压 $\pm U_o$ 的绝对值，等于所选用的 $78 \times \times$ 和 $79 \times \times$ 的输出电压。例如，选用 7815 和 7915，则该电路的稳压输出电压为 $\pm 15V$ 。

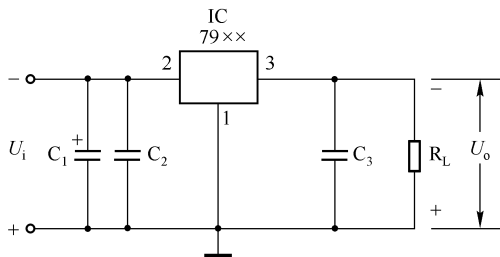


图 9-123 输出电压为固定负电压的稳压电路

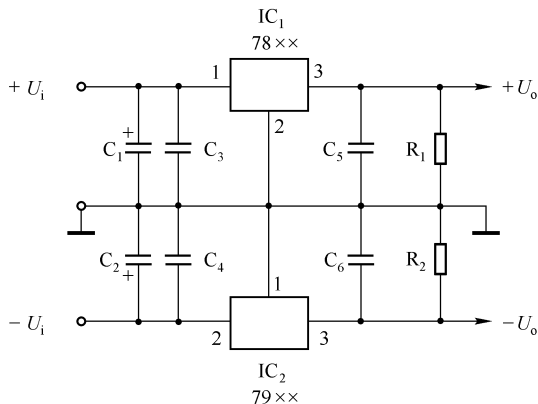


图 9-124 固定正、负对称输出集成稳压电路

(2) 输出电压连续可调的稳压电路

图 9-125 为正电压输出可调稳压电路。集成电路 IC 采用三端正输出可调集成稳压器 CW117。电阻 R 和电位器 RP 组成调压电路，当电位器 RP 的动臂向上移动时，输出电压 U_o 提高；当 RP 的动臂向下移动时，输出电压 U_o 下降。

图 9-126 为负电压输出可调稳压电路。集成电路 IC 采用三端负输出可调集成稳压器 CW137。当调压电位器 RP 的动臂向上移动时，输出电压 $-U_o$ 的绝对值提高；当 RP 的动臂向下移动时，输出电压 $-U_o$ 的绝对值下降。

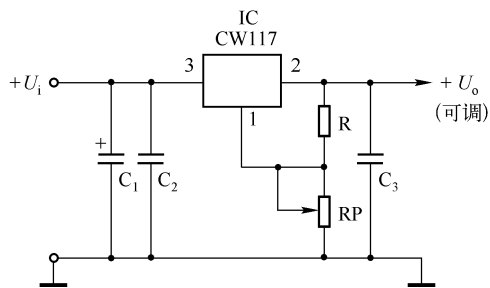


图 9-125 正电压输出可调稳压电路

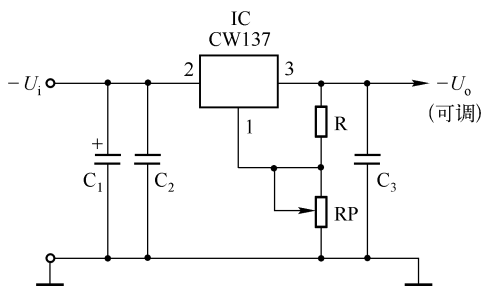








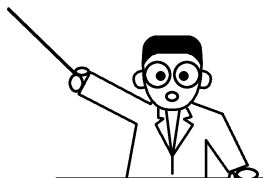


图 9-126 负电压输出可调稳压电路

第 10 章

融会贯通——看懂整机 电路图

-  10.1 看懂整机电路图的基本方法与步骤
-  10.2 怎样看自动调频收音机电路图
-  10.3 怎样看开关稳压电源电路图
-  10.4 怎样看音频信号注入/寻迹器电路图
-  10.5 怎样看电子镇流器电路图
-  10.6 怎样看外置频谱显示器电路图
-  10.7 怎样看数字抢答器电路图
-  10.8 怎样看模拟环绕声处理器电路图



看图识电子电路图



前面介绍了电路图的基本知识、元器件的符号和作用、单元电路的分析方法和技巧等，综合运用这些知识和方法，就可以看懂整机电路图。



10.1 看懂整机电路图的基本方法与步骤

分析整机电路图，应遵循从整体到局部、从输入到输出、化整为零、聚零为整的思路和方法，用整机原理指导具体电路分析、用具体电路分析诠释整机工作原理。通常可以按照以下步骤对整机电路图进行分析。



10.1.1 宏观掌控——了解电路整体功能

一个设备的电路图是为了完成和实现这个设备的整体功能而设计的，搞清楚电路图的整体功能和主要技术指标，就可以从宏观上对该电路图有一个基本的认识，因此这是看图识图的第一步。

电路图的整体功能可以从设备名称入手进行分析，如直流稳压电源的功能是将交流 220V 市电变换为稳定的直流电压输出，如图 10-1 所示。超外差收音机的功能是接受无线电台的广播信号，解调还原为音频信号播放出来，如图 10-2 所示。红外无线耳机的功能是将音响设备的声音信号调制在红外线上发射出去，再由接收机接收解调后还原为声音通过耳机播放，如图 10-3 所示。



图 10-1 直流稳压电源方框图

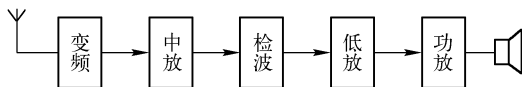


图 10-2 超外差收音机方框图

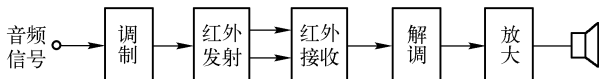


图 10-3 红外无线耳机方框图

下面以如图 10-4 所示的功率放大器电路图为例，具体讲述分析电路图的方法与步骤。该功率放大器的整体功能是对信号电压进行功率放大，主要技术指标如下。

- ① 额定输出功率：每声道 20W。
- ② 输入灵敏度：100mV。
- ③ 输入阻抗：50k Ω 。
- ④ 电压增益：40dB。
- ⑤ 音调控制范围：低音 32dB，高音 40dB。

10.1.2 确定方向——判断电路图走向

电路图一般是以所处理信号的走向为顺序，按照一定的习惯规律绘制的。分析电路图总体上也应该按照信号的处理走向进行。因此，分析一个电路图时需要明确该图的信号处理走向。

判断电路图信号处理走向的基本方法是，根据电路图的整体功能，找出整个电路图的总输入端和总输出端，即可判断出电路图的信号处理走向。例如，在如图 10-1 所示直流稳压电源电路中，接入交流 220V 市电处为总输入端，输出直流稳定电压处为总输出端；在如图 10-2 所示超外差收音机电路中，磁性天线为总输入端，扬声器为总输出端；在如图 10-3 所示红外无线耳机电路中，接入音频信号处为发射机的输入端，红外发光二极管为发射机的输出端；光电二极管为接收机的输入端，耳机为接收机的输出端。从总输入端到总输出端的走向，即为电路图的信号处理走向。

(1) 一般电路的信号处理走向

通常电路图的画法是将信号处理流程按照从左到右的方向依次排列。在如图 10-4 所示功率放大器电路图中，由于整机的功

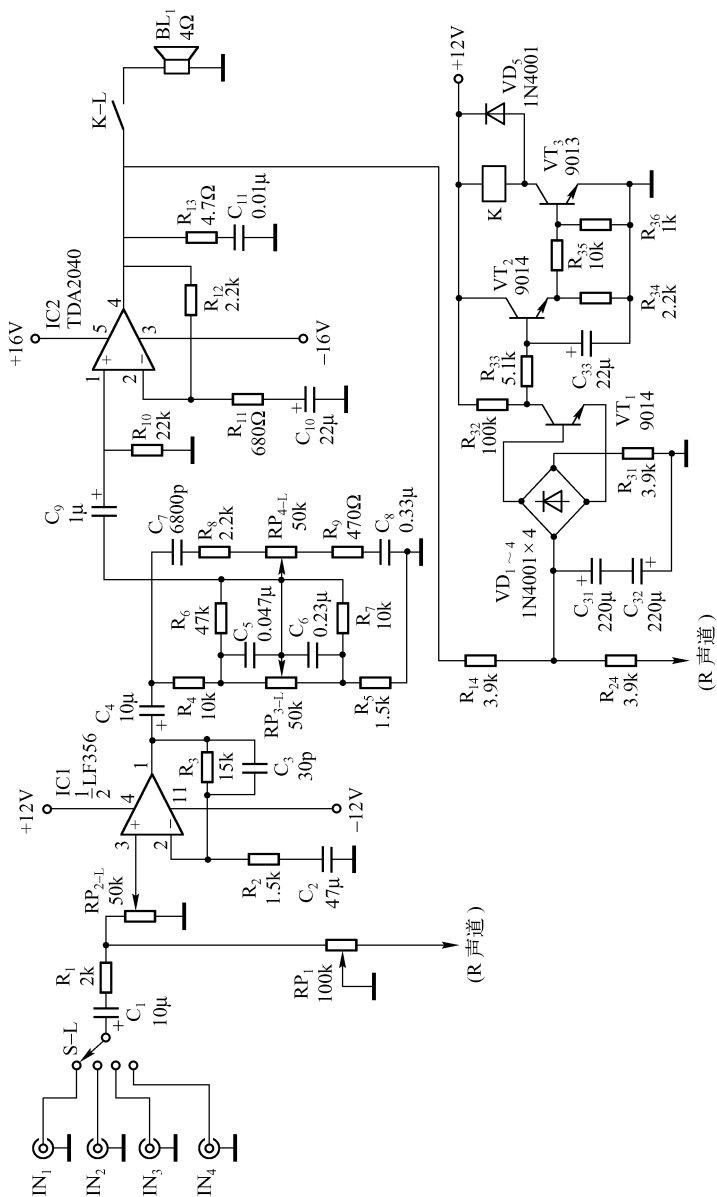


图 10-4 功率放大器电路图



能是功率放大，因此信号接入端“IN”为电路的总输入端，扬声器 BL 为总输出端，电路图的信号处理走向为从左到右，符合习惯画法。

(2) 反馈电路的信号处理走向

有些电路图中具有反馈电路。反馈信号的走向一般与主电路通道的走向相反。如果主电路的信号处理走向为从左到右，则反馈信号的走向为从右到左。在如图 10-5 所示超外差收音机电路方框图中，自动增益控制电路（AGC）是一反馈电路，反馈信号走向为从右到左，与主电路从左到右的信号走向相反。

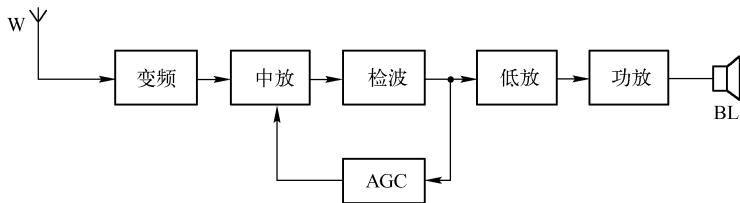


图 10-5 超外差收音机电路方框图

(3) 复杂电路的信号处理走向

由于某种原因，某些较复杂的电路图在总体符合以上规则的情况下，部分信号处理的走向做了逆向安排，这也是常见的，但通常会用箭头符号指示出走向。例如，在如图 10-6 所

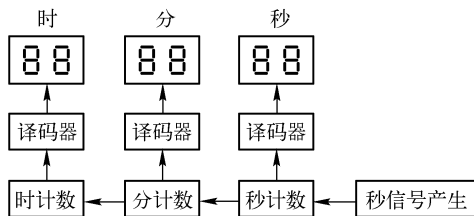


图 10-6 电子钟电路方框图



示电子钟电路方框图中，为了符合人们看图时的“时”、“分”、“秒”的视觉习惯，就采用了从右到左、从下到上的非常规的信号走向。

▶▶ 10.1.3 化整为零——分解电路图

除了一些非常简单的电路外，大多数电路图都是由若干个单元电路组成的。掌握了电路图的整体功能和信号处理走向，可以说是对电路有了一个宏观的、整体的基本了解，但是要深入地具体分析电路的工作原理，还必须将复杂的电路图分解为具有不同功能的单元电路。

一般来讲，晶体管和集成电路是各单元电路的核心元器件，因此可以以晶体管或集成电路为中心，按照信号处理走向将电路图分解为若干个单元电路，并据此画出电路原理方框图。方框图可有助于我们掌握和分析电路图。

例如，对于如图 10-4 所示功率放大器电路图，可以根据集成电路等核心元器件，将整机电路图分解为以下 7 个单元电路。

- ① 波段开关 S 等构成的输入选择电路。
- ② 电位器 RP_1 等构成的平衡调节电路。
- ③ 电位器 RP_2 等构成的音量调节电路。
- ④ 集成电路 IC_1 等构成的前置放大电路。
- ⑤ 电位器 RP_3 、 RP_4 等构成的音调调节电路。
- ⑥ 集成电路 IC_2 等构成的功率放大电路。
- ⑦ 晶体管 $VT_1 \sim VT_3$ 等构成的保护电路。

其中，②~⑥组成主信号通道，①和⑦为辅助电路。功率放大器整机方框图如图 10-7 所示。

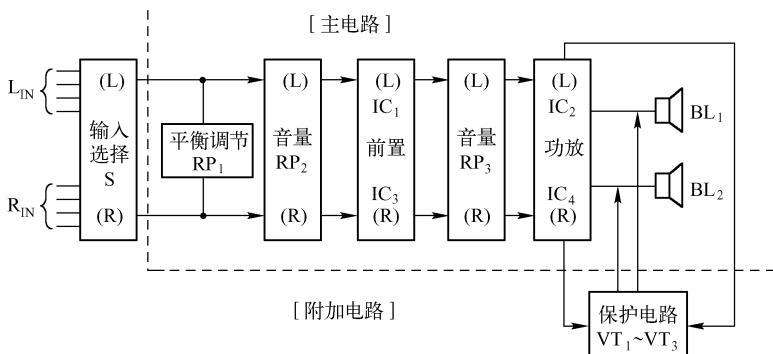


图 10-7 功率放大器整机方框图

10.1.4 重点分析——主通道电路

主通道电路是电路图中基本的、必不可少的电路部分。对于较简单的电路图，一般只有一个信号通道。对于较复杂的电路图，往往具有几个信号通道，包括一个主通道和若干个辅助通道。整机电路的基本功能是由主通道各单元电路实现的，因此分析电路图时应首先分析主通道各单元电路的功能，以及各单元电路间的接口关系。

以如图 10-4 所示功率放大器电路图为例，主通道包括平衡调节、音量调节、前置放大、音调调节和功率放大 5 个单元电路，即如图 10-7 所示方框图中虚线右上部分。主通道各单元电路的功能如下。

- ① 平衡调节电路的功能是平衡左、右声道信号。
- ② 音量调节电路的功能是调节音量大小。
- ③ 前置放大电路的功能是对信号进行电压放大。
- ④ 音调调节电路的功能是调节高、低音。
- ⑤ 功率放大电路的功能是对信号电压进行功率放大。

主通道电路工作过程是，音频信号经平衡调节和音量调节后，由 IC_1 进行电压放大，放大后的信号经音调调节后送入 IC_2



进行功率放大，最后推动扬声器发声。

10.1.5 深入分析——辅助电路

辅助电路的作用是提高基本电路的性能和增加辅助功能。在弄懂了主通道电路的基本功能和原理后，即可对辅助电路的功能及其与主电路的关系进行分析。

仍以如图 10-4 所示功率放大器电路图为例，辅助电路包括输入选择电路和保护电路两个单元电路，即如图 10-7 所示方框图中虚线左下部分，它们的功能如下。

① 输入选择电路的作用是选择音源信号。该辅助电路提高了功率放大器操作使用的方便性。

② 保护电路的作用是开机静噪和扬声器保护。该辅助电路提高了功率放大器使用的安全性。

10.1.6 不可忘记——分析直流供电电路

整机电路的直流工作电源是电池或整流稳压电源，通常将电源安排在电路图的右侧，直流供电电路按照从右到左的方向排列，如图 10-8 所示。直流供电电路中的 R 和 C_1 、 C_2 构成退耦电路，以消除可能经由电源电路形成的有害耦合，这在多级单元电路组成的电路图中很常见。

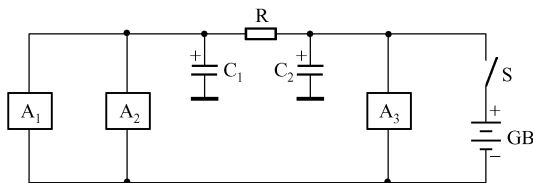


图 10-8 功率放大器的电源电路

如图 10-4 所示功率放大器的直流电源包括 $\pm 12V$ 和 $\pm 16V$ 。 $\pm 12V$ 是前置放大电路 (IC_1) 的工作电源， $\pm 16V$ 是功率放大电路 (IC_2) 的工作电源， $+12V$ 还是保护电路的工作电源。



▶▶ 10.1.7 各个击破——具体分析各单元电路

在以上整体分析电路图的基础上,即可对各个单元电路进行详细的分析,弄清楚其工作原理和各元器件的作用,计算或核算技术指标。下面通过一些实例来具体介绍看懂整机电路图的方法和技巧。



10.2 怎样看自动调频收音机电路图

自动选台立体声调频收音机,接收范围为 87 ~ 109MHz,采用立体声耳机收听,具有自动选台、自动静噪功能。由于全部采用专用集成电路,无可变电容器、无中频变压器,电路简洁,工作可靠,制作容易,调试简单。整机使用两节 5 号电池作为电源,体积小、重量轻、便于携带。

▶▶ 10.2.1 电路结构与整机工作原理分析

图 10-9 为自动选台立体声调频收音机的电路图。电路中共使用 3 块集成电路: IC_1 为 FM 自动选台专用集成电路 TDA7088, IC_2 为立体声解码集成电路 TA7342, IC_3 为双声道功放集成电路 TDA7050。我们可以依据这 3 块集成电路分析整机电路图。

整机电路主要由以下部分组成。

- ① 调频接收放大与鉴频电路,由 IC_1 等组成的。
- ② 立体声解码电路,由 IC_2 等组成的。
- ③ 音频功率放大电路,由 IC_3 等组成的。
- ④ 直流电源为 3V 电池。

本机借用立体声耳机引线兼作接收天线,轻触开关 SB_1 是选台复位按钮, SB_2 是选台搜索按钮,双连电位器 RP_2 为音量电位器, VD_1 为变容二极管, VD_2 为立体声指示发光二极管。图 10-10 为自动选台立体声调频收音机的原理方框图。

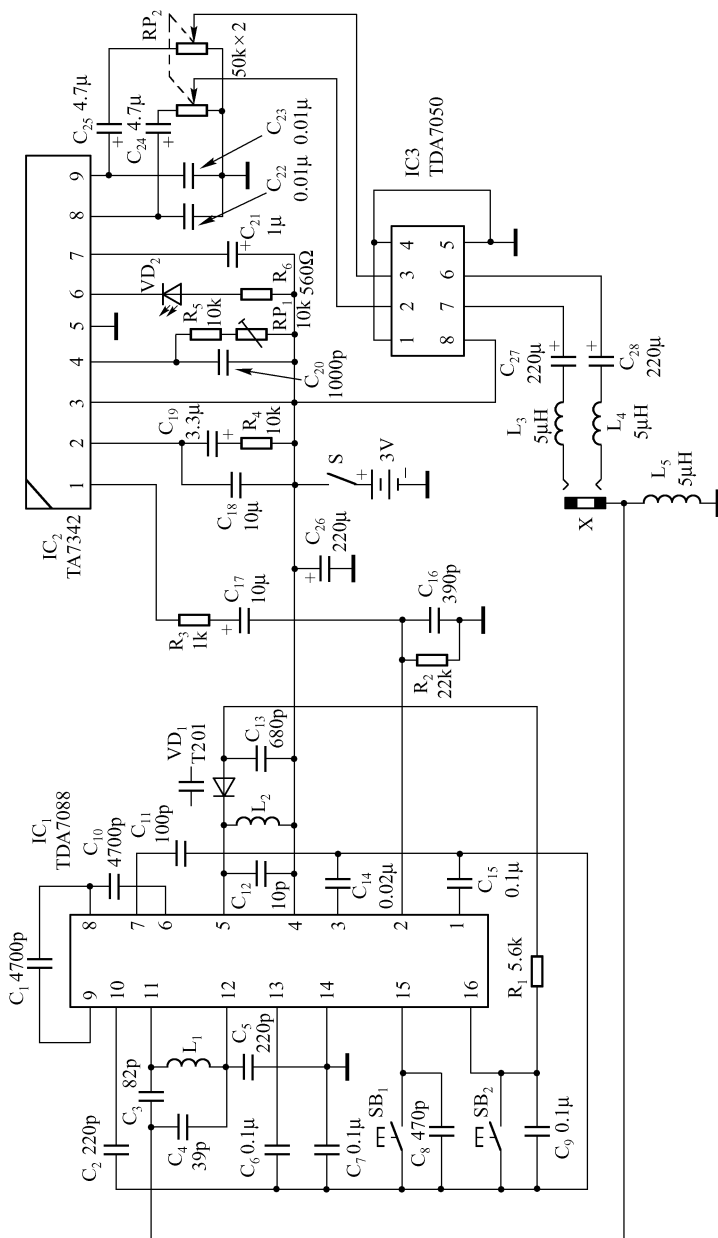


图 10-9 自动选台立体声调频收音机的电路图

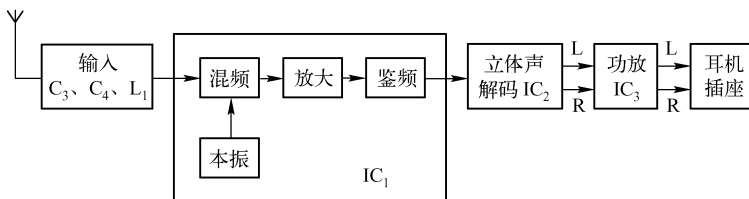


图 10-10 自动选台立体声调频收音机的原理方框图

整机电路工作过程为：调频广播电台信号由天线（耳机引线）接收，通过 C_3 、 C_4 、 L_1 组成的输入回路进入 IC₁，进行放大和鉴频后，从其 2 脚输出立体声复合信号，经 C_{17} 、 R_3 送入 IC₂ 解码。解码出的左、右声道音频信号分别经 C_{24} 、 C_{25} 和音量电位器 RP_2 送入 IC₃ 进行双声道功率放大，然后由其 6、7 脚输出，分别通过 C_{27} 、 L_3 和 C_{28} 、 L_4 接至立体声耳机插座 X。将立体声耳机插入插座 X 即可聆听调频电台广播。

10.2.2 调频接收放大与鉴频电路分析

调频接收放大与鉴频电路的作用是接收调频广播信号并处理转换为立体声复合信号。该电路采用专用集成电路 TDA7088 (IC₁)。TDA7088 工作原理如图 10-11 所示。

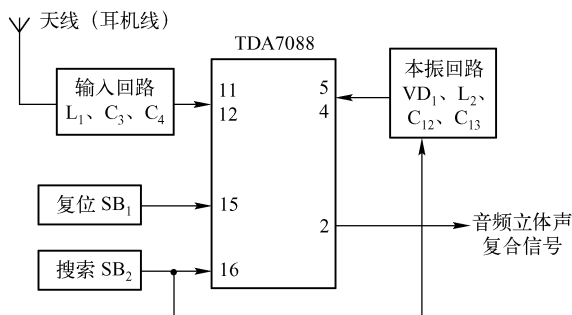


图 10-11 TDA7088 工作原理



输入回路由 C_3 、 C_4 、 L_1 等组成。其作用是滤除调频广播波段以外的干扰信号，并将调频广播信号送入 IC_1 （TDA7088）的第11、12脚。输入回路无须调谐。

本机振荡回路由变容二极管 VD_1 、电感 L_2 、电容 C_{12} 和 C_{13} 及 IC_1 （TDA7088）的第4、5脚的内电路组成。接收电台的频率由本机振荡频率决定。

调频接收放大与鉴频电路的工作过程如下： IC_1 （TDA7088）的第16脚输出的调谐电压加至本振回路中的变容二极管 VD_1 正极，当按一下选台按钮 SB_2 时，16脚输出的调谐电压便逐渐下降，使得 VD_1 上的反向工作电压逐渐增加，等效电容量逐渐减小，本机振荡频率逐渐升高，从而达到自动调台的目的。接收到广播电台信号时，16脚输出的调谐电压即停止变化，使该电台信号被锁定，并在 IC_1 内部进行放大、鉴频，得到的立体声复合信号由第2脚输出。

▶▶ 10.2.3 立体声解码电路分析

立体声解码电路的作用是将立体声复合信号解码成为左声道和右声道音频信号。该电路由解码集成电路 TA7342（ IC_2 ）构成，如图10-12所示。

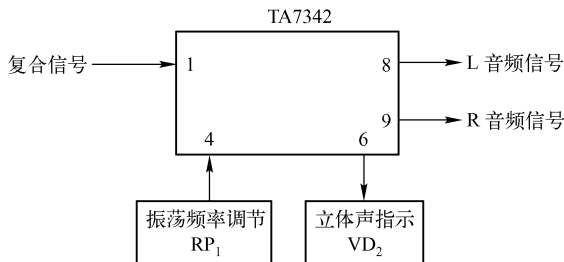


图 10-12 TA7342 工作原理

立体声解码电路的工作过程如下：立体声复合信号由第1脚



输入 IC_2 (TA7342) 进行解码, 分离成为左声道音频信号和右声道音频信号, 分别由其第8、9脚输出。 C_{24} 、 C_{25} 为左、右声道输出耦合电容。双连同轴电位器 RP_2 可调节输出信号的大小, 用于立体声音量调节。通过调节 RP_1 的数值, 即可可以调节 76kHz 振荡频率, 使立体声分离最好。当正常接收并解码出立体声信号时, 立体声指示灯 VD_2 点亮。



10.2.4 音频功率放大器电路分析

音频功率放大器的作用是分别对左、右声道的音频信号进行功率放大, 以驱动立体声耳机发声。电路采用了双声道音频功放集成电路 TDA7050 (IC_3)。其内部包含有两套完全一样的音频功率放大器, 如图 10-13 所示。

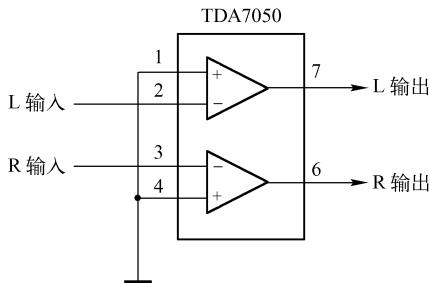


图 10-13 TDA7050 工作原理

音频功率放大器的工作过程如下: IC_3 (TDA7050) 的第2、3脚为左、右声道音频信号输入端, 第7、6脚为左、右声道功放信号输出端。 C_{27} 、 C_{28} 为输出耦合电容。由于本机采用耳机线兼作接收天线, 为避免广播电台的高频信号被功放电路短路, 在功放输出端与耳机插座间串接有电感 L_3 、 L_4 , 阻止高频信号通过。同理, 在耳机插座公共端与地之间也串接有电感 L_5 。TDA7050 无须外围元件, 使用极为方便简单。



10.3 怎样看开关稳压电源电路图

开关稳压电源废除了笨重的工频电源变压器，主控功率管工作于开关状态，因此具有效率高、自身功耗低、适应电源电压范围宽、体积小、重量轻等显著特点。特别是采用开关电源专用集成电路设计的开关稳压电源，各项技术指标大幅度优化、保护电路完善、工作可靠性显著提高。开关稳压电源已广泛应用在计算机、彩电、VCD 和 DVD、摄录像机、充电器、电源变换器、电子仪器仪表、电子游戏机等方面。下面以一款 12V、20W 的开关稳压电源为例，介绍其电路图的分析方法。

▶▶ 10.3.1 电路图总体分析

该开关稳压电源采用 TOP 系列开关电源集成电路为核心设计，具有优良的技术指标：输入工频交流电压范围为 85 ~ 265V，输出直流电压为 12V，最大输出电流为 2.5A，电压调整率 $\leq 0.7\%$ ，负载调整率 $\leq 1.1\%$ ，效率 $> 80\%$ ，具有完善的过流、过热保护功能。

图 10-14 为开关稳压电源电路图。左侧为交流电源输入端，右侧为直流电压输出端，整机电路从左到右依次由以下 5 个部分组成。

① 电容器 C_1 和电感器 L_1 组成的电源噪声滤波器，用于净化电源和抑制高频噪声。

② 全波整流桥堆 UR 和滤波电容器 C_2 组成的工频整流滤波电路，将交流市电转换为高压直流电。

③ 开关电源集成电路 IC_1 、高频变压器 T 等组成的高频振荡和脉宽调制电路，产生脉宽受控的高频脉冲电压。

④ 整流二极管 VD_2 、滤波电容器 C_5 和 C_6 、滤波电感器 L_2 等组成的高频整流滤波电路，将高频脉冲电压变换为直流电压输出。

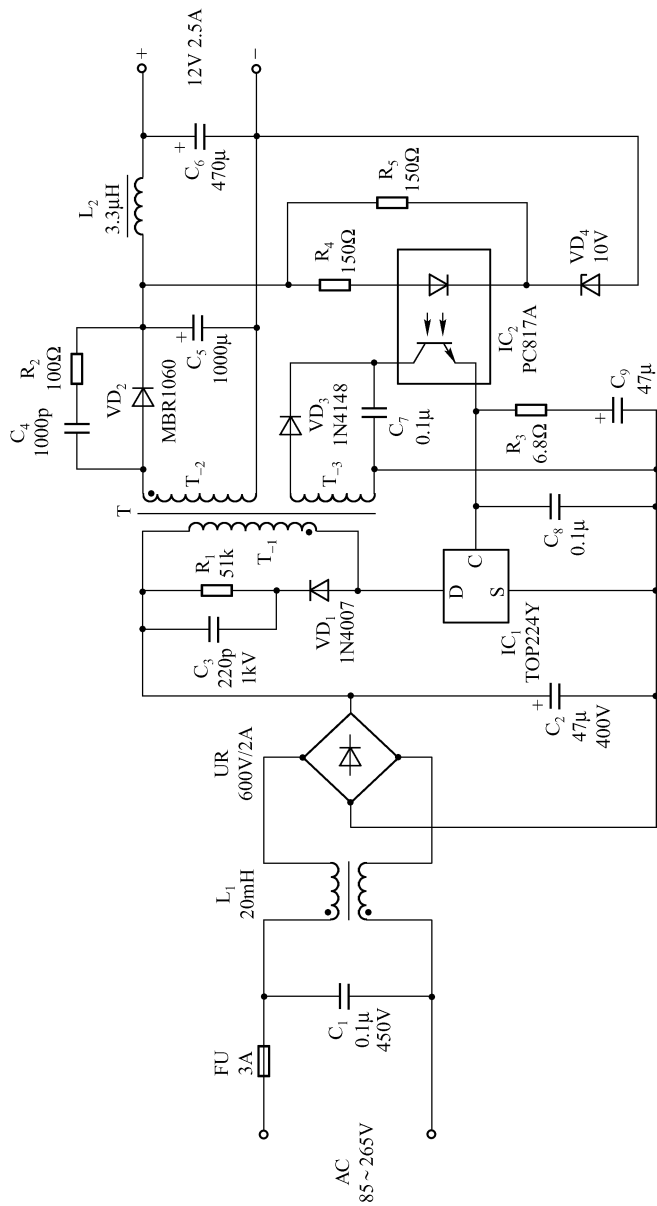


图 10-14 开关稳压电源电路图



⑤ 光电耦合器 IC_2 、稳压二极管 VD_4 等组成的取样反馈电路，将输出直流电压取样后反馈至高频振荡电路进行脉宽调制。图 10-15 为开关稳压电源方框图。

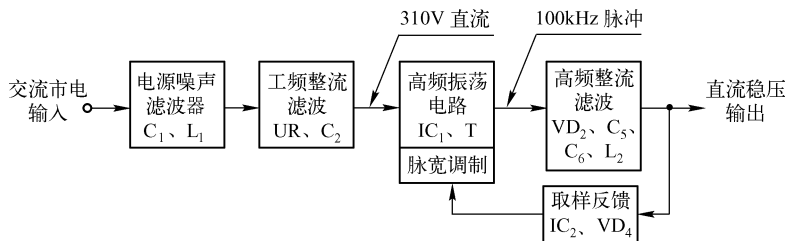


图 10-15 开关稳压电源方框图

电路简要工作过程如下：交流市电接入 AC 端后，依次经过 C_1 、 L_1 电源噪声滤波器、整流桥堆 UR 全波整流、电容器 C_2 滤波后，得到直流高压（当交流市电 = 220V 时，直流高压 $\approx 310V$ ），作为高频振荡和脉宽调制电路的工作电源。

直流高压经高频变压器 T 的初级线圈 T_1 加至集成电路 IC_1 的 D 端， IC_1 (TOP224Y) 内部含有 100kHz 高频振荡器和脉宽调制电路 PWM，在 IC_1 的控制下，通过 T_1 的电流为高频脉冲电流，耦合至高频变压器次级线圈 T_2 ，再经高频整流二极管 VD_2 整流， C_5 、 L_2 、 C_6 滤波后，输出 +12V 直流电压。

T_3 为高频变压器的反馈线圈，用以产生控制电流去改变高频脉冲的占空比。当占空比较大时，输出直流电压较高，当占空比较小时，输出直流电压较低，如图 10-16 所示。通过调整高频脉冲的占空比，可达到稳定输出电压的目的。

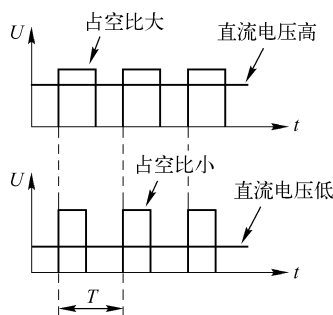


图 10-16 占空比与输出电压的关系



10.3.2 电源噪声滤波器电路分析

C_1 和 L_1 可组成电源噪声滤波器，具有两方面的作用。一是净化电源，滤除经由电源线进入的外界高频干扰。二是防止污染电源，抑制本机电路产生的高次谐波逆向输入电网。

L_1 是绕在同一磁心（通常为圆环形）上的一对线圈，且上下线圈圈数完全相等，其同名端如图 10-14 所示。交流市电输入时（以正半周为例），从 L_1 上线圈流入，从下线圈流出，上、下线圈产生的磁通大小相等、方向相反、互相抵消，因此 L_1 对交流市电的感抗为“0”。

当外界或本机的高频干扰欲通过 L_1 时，因干扰电流在上、下线圈的流向一致，上、下线圈产生的磁通方向相同、互相叠加， L_1 对高频干扰呈现很大的感抗。 C_1 用于吸收高频脉冲干扰。

10.3.3 三端开关电源集成电路分析

电路的核心器件 IC_1 采用 TOP224Y，是一种脉宽调制（PWM）型单片开关电源集成电路，内部含有 100kHz 振荡器、脉宽调制器、控制电路、高压场效应功率开关管、保护电路等。图 10-17 为 TOP224Y 内部电路原理方框图。

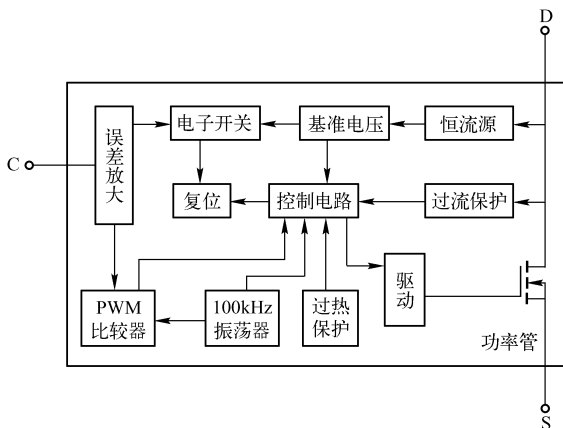


图 10-17 TOP224Y 内部电路原理方框图



TOP224Y 具有以下特点。

- ① 只有3个引出脚：源极 S、漏极 D 和控制极 C，集成度高，使用方便。
- ② 由加在 C 极上的控制电流 I_c 来调节脉冲波形的占空比，调节范围为 0.7% ~ 70%， I_c 越大，占空比越小。
- ③ 输入交流电压的范围极宽，输入为 85 ~ 265V、47 ~ 440Hz 的交流电均可正常工作。
- ④ 采用 100kHz 的开关频率，有利于减小体积，提高效率。
- ⑤ 具有过流、过热保护、调节失控自动关断和自动重新启动等功能，工作稳定可靠。

10.3.4 脉宽调制电路分析

脉宽调制电路由 TOP224Y (IC_1)、高频变压器 (T)、光电耦合器 (IC_2) 等组成，是开关稳压电源的核心电路，功能是变压和稳压。如图 10-18 所示，由输入交流市电直接整流获得的 +310V 直流高压，经高频变压器初级线圈 T_{-1} 、 IC_1 的 D-S 端构成回路。由于 IC_1 的 D-S 间的功率开关管按 100kHz 的频率开关，因此通过 T_{-1} 的电流为 100kHz 脉冲电流，并在次级线圈 T_{-2} 上产生高频脉冲电压，经整流滤波后输出。

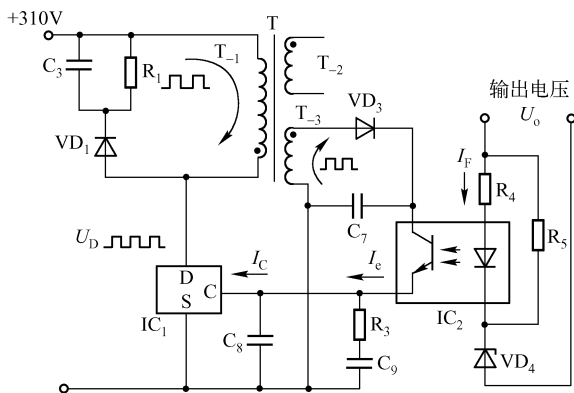


图 10-18 脉宽调制电路工作原理



T_{-3} 为高频变压器的反馈线圈，其感应电压由 VD_3 整流后作为 IC_1 的控制电压，经光耦 (IC_2) 中接收管 c-e 极加至 IC_1 的控制极 C 端，为 IC_1 提供控制电流 I_c 。

脉宽调制稳压过程如下：如果因为输入电压升高或负载减轻导致输出电压 U_o 上升，一方面 T_{-3} 上的反馈电压随之上升，使经 VD_3 整流后通过光耦接收管的电流 I_c 增大，即 IC_1 控制极 C 端的控制电流 I_c 上升；另一方面，输出电压 U_o 上升也使光耦发射管的工作电流 I_F 上升，发光强度增加，致使接收管导通性增加， I_c 增大，同样也使控制电流 I_c 上升。

I_c 上升使得 IC_1 的脉冲占空比下降，迫使输出电压 U_o 回落，最终保持输出电压 U_o 的稳定。控制电流 I_c 与高频脉冲占空比的关系如图 10-19 所示曲线。如果某种原因导致输出电压 U_o 下降时的稳压过程与前述相似，只是调节方向相反。

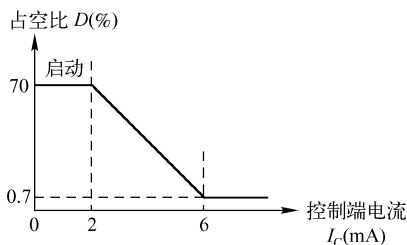


图 10-19 控制电流 I_c 与高频脉冲占空比的关系

VD_1 为钳位二极管， R_1 、 C_3 组成吸收电路，用于钳位并吸收高频变压器关断时漏感产生的尖峰电压，对 IC_1 起到保护作用。 C_8 、 C_9 是控制电压旁路滤波电容， C_9 同时与 R_3 组成控制环路补偿电路，决定电路自动重新启动时间。 R_4 是光耦发射管的限流电阻， R_5 为稳压二极管 VD_4 提供足够的工作电流。

10.3.5 高频整流滤波电路分析

高频变压器次级线圈 T_{-2} 上的 100kHz 高频脉冲电压，经整流滤波后成为 +12V 直流电压输出。为降低整流管损耗、提高高



频脉冲电压整流效率，整流二极管 VD_2 采用肖特基二极管 MBR1060。

C_4 、 R_2 组成 RC 吸收网络，并联在 VD_2 两端，能够消除高频自激振荡，减小射频干扰。 C_5 、 L_2 和 C_6 组成 Π 形 LC 滤波器，能较好地滤除高频脉冲成分，输出纯净的直流电压。如需要其他输出电压值，改变高频变压器 T 初、次级的圈数比和 VD_4 的稳压值即可。

TOP224Y 是典型的三端器件，外形及各引脚如图 10-20 所示，使用时应加散热片，以满载时该集成电路不烫手为宜。安装高频变压器时应注意各绕组的名端不能弄错。整机建议采用具有屏蔽功能的金属外壳，有利于进一步降低电磁干扰。外壳上应有散热孔。

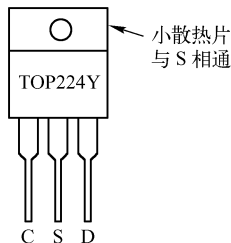


图 10-20 TOP224Y 外形及各引脚



10.4 怎样看音频信号注入/寻迹器电路图

音频信号注入/寻迹器是一种较简单的常用仪器，可用于检修收音机、录音机、CD 机、扩音机等音频设备，以及检修电视机、影碟机、家庭影院等设备的音频电路。音频信号注入/寻迹器实际上是两种仪器的结合。

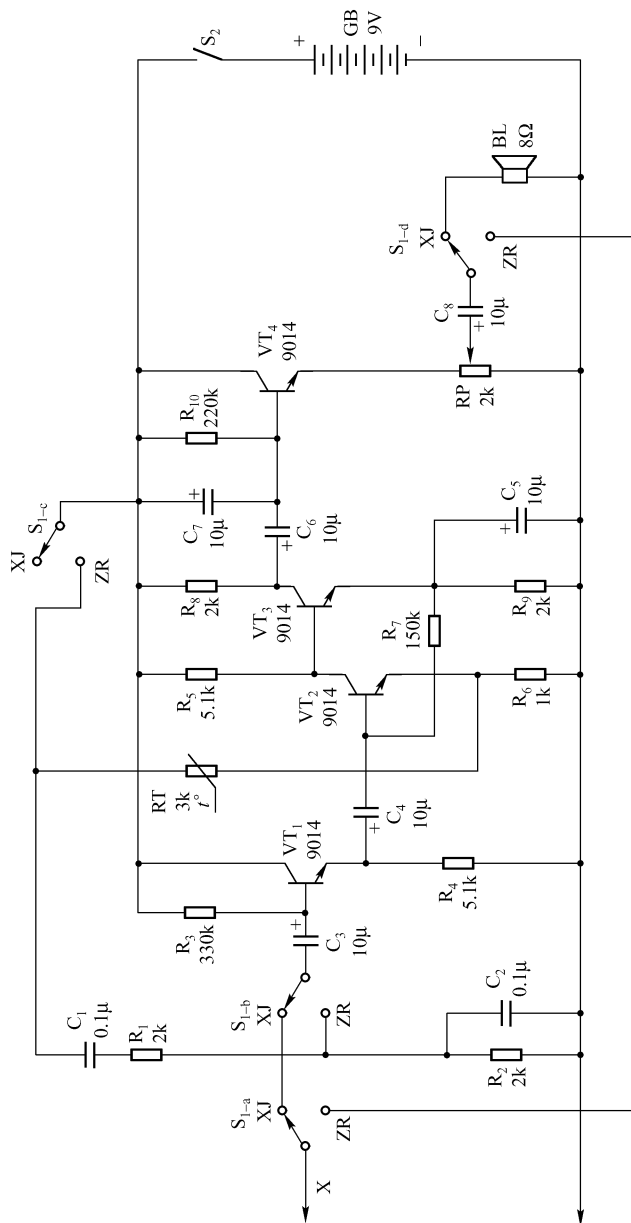
① 信号注入器。通过仪器前端的探针，向被检修电路各级注入音频信号，以判断出故障所在。

② 信号寻迹器。通过仪器前端的探针，从被检修电路各级探寻音频信号，以判断出故障所在。

下面具体分析音频信号注入/寻迹器的电路图。

10.4.1 整机电路图分析

图 10-21 为音频信号注入/寻迹器的电路图。由于该仪器具有





“信号注入”和“信号寻迹”两种功能，因此首先可以判断出 S_1 是功能选择开关。当 S_1 置于“XJ”挡时，电路组成信号寻迹器；当 S_1 置于“ZR”挡时，电路组成信号注入器。

在如图 10-21 所示电路中， S_1 指向“XJ”挡，电路组成信号寻迹器。我们知道，信号寻迹器的功能是将检测电路的音频信号放大后播放出来，因此电路图左边的探针（X）是信号输入端，电路图右边的扬声器（BL）是最终负载，信号处理走向为从左到右。作为整机电源的电池（GB）在电路图的右边，因此直流供电电路走向为从右到左。

图 10-21 符合电路图的通常画法，即将信号处理走向按照从左到右的方向排列，将直流供电电路按照从右到左的方向排列。读者今后分析电路图，一般均可先假定其画法是符合上述电路图的通常画法的。

▶▶ 10.4.2 信号寻迹器电路分析

从如图 10-21 所示电路图（ S_1 指向“XJ”）可见，信号寻迹器电路的主要元器件是 4 个晶体管。以这 4 个晶体管为核心，可将电路图分为 3 个单元，从左到右依次为：以晶体管 VT_1 为核心的输入缓冲单元，以晶体管 VT_2 和 VT_3 为核心的电压放大单元，以晶体管 VT_4 为核心的电流放大单元。

以上 3 个单元电路组成了音频信号寻迹器的整体电路。图 10-22 为其方框图。其总的电路工作原理是：由探针 X 从被检测电路取出微弱的音频信号，经 VT_1 缓冲后送入 VT_2 、 VT_3 进行电压放大，再经 VT_4 电流放大后推动扬声器 BL 发声。下面我们从左到右依次分析电路图各单元电路。

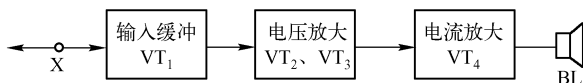


图 10-22 音频信号寻迹器的整体电路方框图



(1) 输入缓冲单元电路分析

晶体管 VT_1 与 R_3 、 R_4 等构成一个射级跟随器，信号从 VT_1 的基极输入，发射极输出。 C_3 、 C_4 分别为输入端和输出端的隔直流耦合电容。射级跟随器实际上是一个共集电极放大电路，输出信号由发射极电阻 R_4 上取出，同时， R_4 又串联在输入信号回路中，将输出电压全部负反馈到输入端，因此，这还是一个反馈系数为 1 的电压串联负反馈放大器。由于深度负反馈的作用，射级跟随器具有很高的输入电阻、很低的输出电阻，其电压增益略小于 1，输出电压与输入电压同相，电流增益等于晶体管电流放大系数。

射级跟随器作为整个仪器的输入级，由于其具有很高的输入阻抗，对被检测电路的影响极小，在被检测电路与放大电路之间起到了缓冲隔离作用。 R_3 是偏置电阻，为 VT_1 提供基极偏置电流。

(2) 电压放大单元电路分析

晶体管 VT_2 、 VT_3 等构成双管电压放大器，对输入缓冲级送来的被检测信号进行放大。射级跟随器 VT_1 输出的信号，由 C_4 耦合至 VT_2 基极，经双管放大器放大后，从 VT_3 集电极输出并由 C_6 耦合至后续电路。

双管放大器具有电压增益大、工作点稳定度高的特点。双管放大器由两级共发射极放大器直接耦合而成，总的电压增益等于两级电压增益的乘积。 VT_2 的基极偏置电压不是取自电源电压，而是通过 R_7 取自 VT_3 的发射极电压（ R_9 上的压降），构成直流负反馈来稳定电路的工作点。

例如，当由于某种原因造成 VT_2 集电极电流上升时，由于直接耦合使 VT_3 集电极电流下降， R_9 上压降也下降，通过 R_7 反馈至 VT_2 基极，迫使 VT_2 集电极电流回落，从而保持了工作点的稳定。调节 R_7 的阻值，即可改变 VT_2 与 VT_3 的工作点。 R_5 、 R_8 分别为 VT_2 、 VT_3 的集电极电阻。 R_6 是 VT_1 的发射极电阻，可产生电流负反馈以进一步稳定本级工作点。



(3) 电流放大单元电路分析

双管放大器输出的电压信号要驱动负载（扬声器），还需要经过电流放大。晶体管 VT_4 等构成电流放大器其实质也是一个射级跟随器。由前面分析已知，射级跟随器具有较大的电流放大倍数，电压放大倍数约为 1，因此具有较大的功率增益，足以驱动扬声器发声。电位器 RP 用于调节音量大小。 C_8 为隔直流耦合电容。 R_{10} 是 VT_4 的偏置电阻。

10.4.3 信号注入器电路分析

当如图 10-21 所示电路图中功能选择开关 S_1 指向“ZR”时，电路构成信号注入器，可分为 2 个单元，从左到右依次为：以晶体管 $VT_1 \sim VT_3$ 为核心的音频振荡单元，以晶体管 VT_4 为核心的输出缓冲单元。图 10-23 为其方框图。其总的电路工作原理是：振荡器（ $VT_1 \sim VT_3$ ）产生的音频信号，经射级跟随器（ VT_4 ）缓冲后，由探针 X 送入被检测电路。

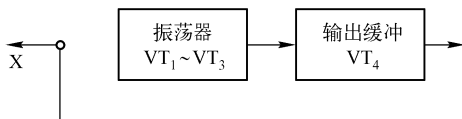


图 10-23 音频信号注入器方框图

(1) 电路功能的转换

电路功能的转换由功能选择开关 S_1 完成。 S_1 是四刀二挡开关。当 S_1 从“XJ”转为“ZR”时（由信号寻迹器转为信号注入器），整个电路有以下变化：① S_{1-b} 和 S_{1-c} 将反馈网络（ C_1 、 C_2 、 R_1 、 R_2 、 RT ）接入电路；② S_{1-a} 将探针 X 与 VT_1 的连接切断；③ S_{1-d} 将 VT_4 的输出端接至探针 X，而切断与扬声器 BL 的连接。

(2) 音频振荡器电路分析

晶体管 $VT_1 \sim VT_3$ 等构成的音频振荡器是一个典型的 RC 桥



式振荡器，由 RC 电桥和放大器两部分组成。图 10-24 为其原理方框图。RC 桥式振荡器具有体积小、易起振、振荡波形好、频率调节范围宽等优点，在低频振荡器中获得广泛应用。

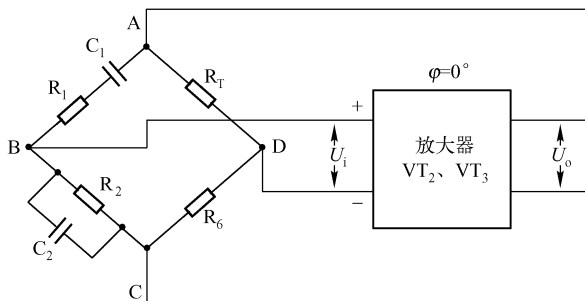


图 10-24 RC 桥式振荡器原理方框图

RC 桥式振荡器是用 RC 电桥作为反馈回路的振荡器。图 10-24 左半部分为 RC 电桥，电桥的左边是由 C_1 、 R_1 串联和 C_2 、 R_2 并联组成的两个臂，右边是由 R_T 和 R_6 构成的两个臂。放大器的输出电压 U_o 加到电桥的一个对角线 AC，从电桥的另一个对角线 BD 取出反馈电压 U_i 送回放大器输入端。

我们知道，形成振荡的相位条件是正反馈，即 U_i 与 U_o 同相。当 RC 一定时，电桥只在一个频率上满足这一点，因此 RC 电桥具有选频作用，频率 $f = 1/(2\pi RC)$ 。式中， $R = R_1 = R_2$ ， $C = C_1 = C_2$ 。改变 R、C 的值，即可改变振荡频率 f 。在如图 10-21 所示电路中， $f \approx 800\text{Hz}$ 。

RC 桥式振荡器要求其放大器相移为“0”，且有足够的放大倍数。 VT_2 和 VT_3 组成的双管放大器，其输入与输出同相，可以满足这个要求。对放大器而言，电桥左边 $(C_1 + R_1)$ 臂和 $(C_2 // R_2)$ 臂构成正反馈选频电路，右边 R_T 臂和 R_6 臂构成负反馈稳幅电路。 R_6 同时还是 VT_2 的发射极电阻。

RC 振荡器中的放大器必须工作在甲类放大状态，以保证良好的振荡波形，所以 RC 振荡器不能像 LC 振荡器那样利用振荡



管本身工作到非线性区域来保持振荡的稳定。可行的办法是在负反馈电路中采用热敏电阻。在如图 10-21 所示电路中, RT 是负温度特性热敏电阻。当振荡器输出电压 U_o 增大时, 通过 RT 的电流加大, RT 温度升高而阻值减小, 负反馈系数 $[R_6 / (R_T + R_6)]$ 增加, 放大器电压增益下降, 把 U_o 拉低, 使振荡趋于稳定。

射级跟随器 VT_1 接在 RC 电桥与双管放大器之间, 由于射级跟随器具有很高的输入阻抗, 减轻了放大器对 RC 选频网络的影响, 有助于提高频率的稳定度。

(3) 输出缓冲电路分析

输出缓冲电路的作用是隔离负载(被检测电路)对振荡器的不良影响。输出缓冲电路实际上是由 VT_4 构成的一级射级跟随器, 由于其具有很高的输入阻抗, 对振荡电路的影响极小, 同时又具有很低的输出阻抗, 故提高了振荡电路的输出驱动能力。通过电位器 RP 可调节输出信号的大小。

▶▶ 10.4.4 直流供电回路分析

电路图的直流供电回路一般都是从右到左安排, 因此直流供电回路分析也应从右到左进行。从电路图的最右边可见, 整机采用 9V 电池为电源, 从右到左依次为 VT_4 、 VT_3 、 VT_2 、 VT_1 供电。 R_{10} 、 R_7 、 R_3 分别为各管的基极偏置电阻, 改变阻值即可改变相应晶体管的工作点。 C_9 是电源退耦滤波电容。 S_2 是电源开关。



10.5 怎样看电子镇流器电路图

电子节能灯作为新一代的电照明设备, 具有节电、明亮、易启动、无频闪、功率因数高、电源电压范围宽等突出优点, 得到越来越广泛的应用。



▶▶ 10.5.1 电路原理总体分析

电子节能灯由节能荧光灯管和高效电子镇流器两部分组成。节能荧光灯管采用三基色荧光粉制造，发光效率大大提高，是白炽灯的 5~6 倍，比普通日光灯提高 40% 左右。高效电子镇流器采用开关电源技术和谐振启辉技术，工作频率为 40~60kHz，不仅效率和功率因数进一步提高，而且彻底消除了普通日光灯的频闪和“嗡嗡”噪声，对保护眼睛也极为有利。

电子节能灯电路图如图 10-25 所示，除节能灯管以外的电路，习惯上称为电子镇流器。电子镇流器的作用，是将 50Hz 交流 220V 市电变换为 50kHz 高频交流电，再去点亮节能灯管。电路图左边“~220V”处为电路输入端，右边节能灯管为最终负载，电路图的信号处理走向为从左到右的习惯画法。

电子镇流器由以下 4 个单元电路组成。图 10-26 为整机电路方框图。

① 整流二极管 $VD_1 \sim VD_4$ 和滤波电容器 C_1 组成的整流滤波电路。其功能是将交流市电转变为直流电。

② 晶体管 VT_1 、 VT_2 和高频变压器 T 等组成的高压高频振荡电路。其功能是产生高频交流电。

③ 电阻 R_1 、电容 C_2 和双向二极管 VD_8 等组成的启动电路。其功能是在刚接通电源时启动振荡电路。

④ 电容 C_5 、电感 L 等组成的谐振启辉电路。其功能是产生节能灯管所需要的启辉高压。

电路简要工作原理如下：50Hz 的交流 220V 市电接入电路后，直接经整流二极管 $VD_1 \sim VD_4$ 桥式整流、滤波电容器 C_1 滤波后，输出约 310V 的直流电压（空载时），作为高频振荡器的工作电源。

功率开关管 VT_1 、 VT_2 和高频变压器 T 等组成开关式自激振荡器，将 310V 直流电压变换为 50kHz、约 270V 的高频交流电压，作为节能灯管的工作电压，通过 C_5 和 L 组成的谐振启辉电

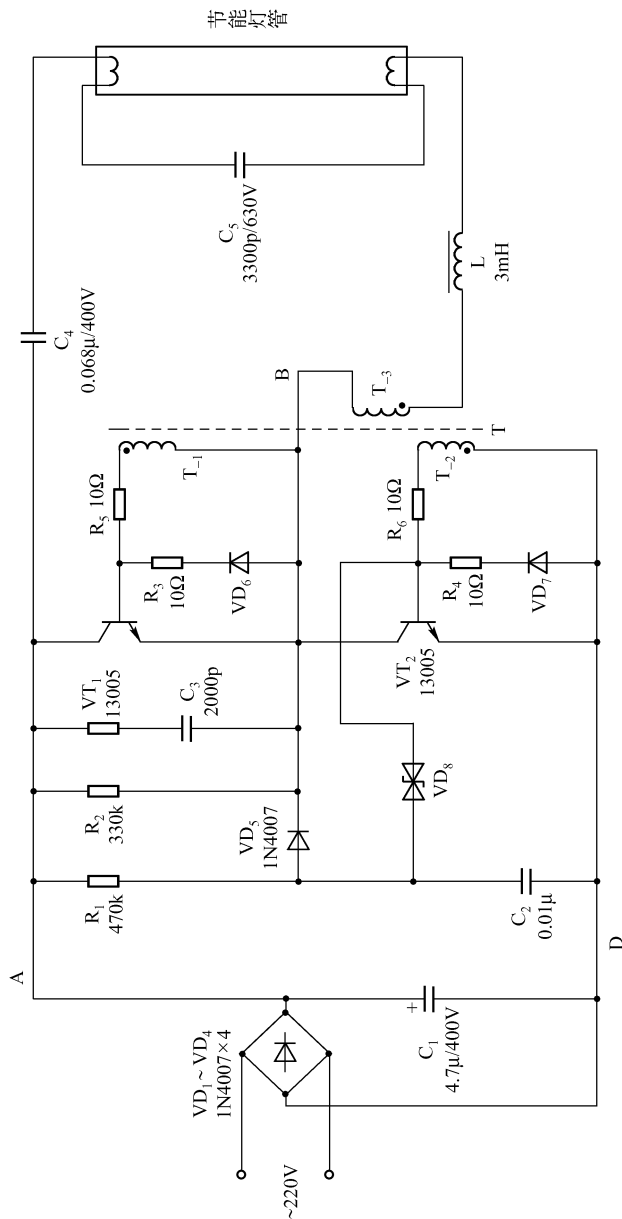


图 10-25 电子节能灯电路图

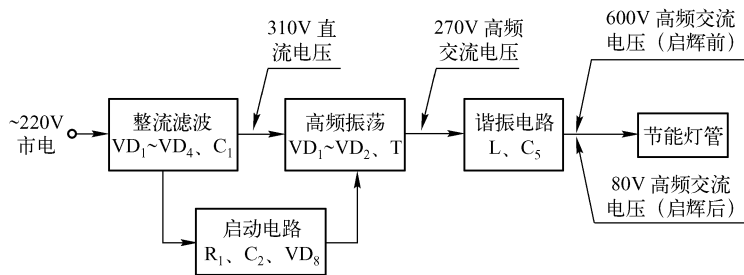


图 10-26 电子镇流器整机电路方框图

路送往节能灯管。

C_5 和 L 组成串联谐振电路。谐振电容 C_5 上的谐振电压为回路电压的 Q 倍（约为 600V ），加在节能灯管两端使其启辉点亮。在刚接通电源时，由 R_1 、 C_2 、 VD_8 组成的启动电路使自激振荡器起振。

10.5.2 市电直接整流电路分析

高频振荡器所需要的直流工作电源，直接由交流 220V 市电整流获得，彻底摒弃了电源变压器，因此电源效率大为提高，设备体积大为缩小。

市电直接整流滤波电路如图 10-27 所示。交流 220V 电源不经过电源变压器而直接由整流二极管 $\text{VD}_1 \sim \text{VD}_4$ 桥式整流，再经滤波电容器 C_1 滤除交流成分后，在 A 端即可输出 $+310\text{V}$ （空载时）的直流电压。

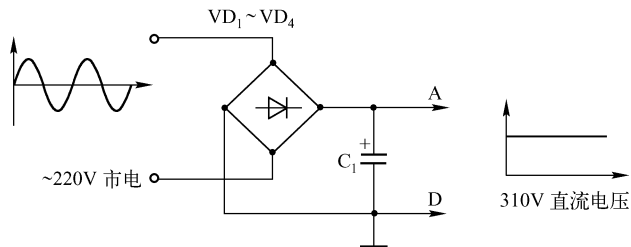


图 10-27 市电直接整流滤波电路



10.5.3 高压高频振荡器电路分析

高压高频振荡器是电子节能灯的核心电路，由振荡电路和启动电路组成。

(1) 振荡电路

功率开关管 VT_1 、 VT_2 和高压变压器 T 等组成开关式自激振荡器，为节能灯管提供高压高频交流电压。接通电源后， VT_2 在启动电路的触发下导通，此时 $+310V$ 直流电压经 C_4 、灯管上端灯丝、 C_5 、灯管下端灯丝、 L 、 T_{-3} 、 VT_2 的集电极 - 发射极形成回路，对谐振电容 C_5 充电，充电电流 $I_{充}$ 如图 10-28 所示中点画线， C_5 上电压为上正、下负。

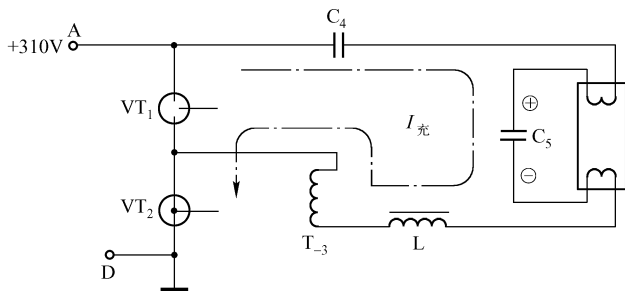
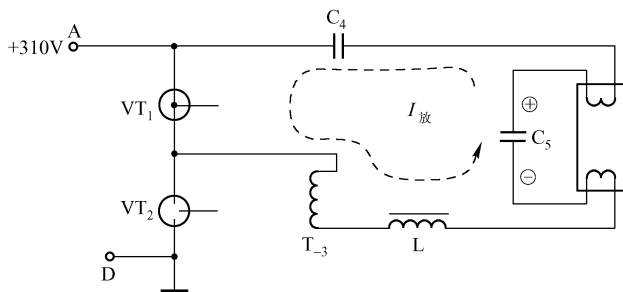


图 10-28 谐振电容 C_5 的充电过程

由于高频变压器 T 各绕组的耦合作用， VT_2 很快由导通变为截止， VT_1 则由截止变为导通，此时谐振电容 C_5 通过灯管上端灯丝、 C_4 、 VT_1 的集电极 - 发射极、 T_{-3} 、 L 、灯管下端灯丝放电，放电电流 $I_{放}$ 如图 10-29 所示中虚线。

同样由于高频变压器 T 各绕组的耦合作用， VT_1 很快也由导通变为截止， VT_2 则又由截止变为导通，如此周而复始， VT_1 、 VT_2 交替导通形成振荡，振荡频率取决于 C_5 、 L 串联谐振电路（如图 10-25 所示电路图所示的谐振频率约为 $50kHz$ ）。

电容 C_4 的作用是隔直流、通交流，阻止 $+310V$ 的直流电压

图 10-29 谐振电容 C_5 的放电过程

直接进入节能灯管，允许 50kHz 的高频交流电压通过。 R_3 、 VD_6 和 R_4 、 VD_7 分别接在 VT_1 和 VT_2 基极回路，为 T_{-1} 和 T_{-2} 提供负半周时的泄放通道。

(2) 启动电路

由于功率开关管 VT_1 、 VT_2 的基极偏置电压均取自高频变压器 T 的振荡反馈电压，电路未起振时两管均因无基极偏置电压而截止，因此在刚接通电源时必须由启动电路使电路起振。

如图 10-30 所示，接通电源后，+310V 直流电压开始经 R_1 对 C_2 充电，当 C_2 上电压上升到双向二极管 VD_8 的阈值时， VD_8 导通，向 VT_2 基极提供偏置电压使其导通，引起振荡。 VT_2 导通后，通过 VD_5 将 C_2 上已充的电压放掉，不影响电路正常振荡。

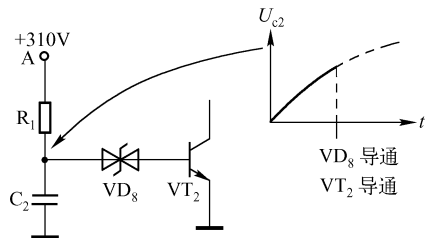


图 10-30 启动电路工作原理



10.5.4 谐振启辉电路分析

节能灯管的工作原理要求必须首先有一个高电压作用于其两端使其启辉，然后再将电压降低维持点亮即可，在普通铁心镇流器日光灯中，由启辉器完成这一任务，而在电子节能灯中，则采用了谐振启辉电路。

谐振启辉电路工作过程如图 10-31 所示。

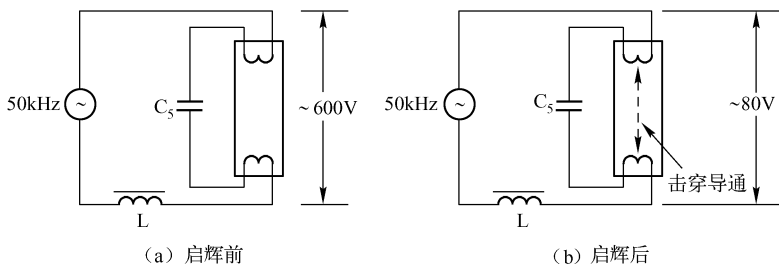


图 10-31 谐振启辉电路工作过程

① 高压高频振荡器提供的 50kHz、约 270V 的交流电压，加在 C_5 、 L 串联谐振回路两端并产生谐振，于是在谐振电容 C_5 两端即产生一个 Q 倍于回路电压的高电压（约为 600V），如图 10-31（a）所示。节能灯管并联于谐振电容 C_5 两端， C_5 两端的电压即为节能灯管的工作电压。串联谐振时， C_5 两端的 600V 高压将节能灯管内的气体击穿而使其启辉。

② 当节能灯管点亮后，内阻急剧下降。该内阻并联于 C_5 两端，使 C_5 、 L 串联谐振电路 Q 值大大下降，故 C_5 两端（即灯管两端）的高启辉电压（约为 600V）下降为正常的工作电压（约为 80V），维持节能灯管稳定地正常发光，如图 10-31（b）所示。



10.6 怎样看外置频谱显示器电路图

高档音响设备一般都有音频频谱显示装置，既可以随时了解



播放信号的瞬时频谱，又具有高雅美观的视觉效果。笔者设计的这款外置式音频频谱显示器，不必与您的音响设备进行任何电气连接，只需放置于音箱前，即可直观地、动态地显示出正在播放的音频信号的频谱，使您的音响系统既好听又好看，增色不少。

▶▶ 10.6.1 电路图总体分析

图 10-32 为外置式音频频谱显示器电路图。该显示器全部采用集成运算放大器和专用集成电路设计而成，电路简洁、工作稳定、制作容易、使用方便。该显示器可以同时 100Hz、300Hz、1kHz、3kHz、10kHz 5 个频率点上（含一定带宽），采用五级动态光柱显示各频率点的瞬时电平。下面着重分析其电路图。

外置式音频频谱显示器的功能，是将音箱播放的声音转换为发光二极管光柱的动态显示，因此可以判断，如图 10-32 所示电路中左边的话筒 BM 是电路输入端，右边的发光二极管是最终负载，电路图的信号处理走向为从左到右。同时可以依据各集成运算放大器或专用集成电路，划分出各单元电路。

- ① 驻极体话筒 BM 等组成拾音电路。
- ② 集成运放 IC₁ 等组成音频电压放大器。
- ③ 集成运放 IC₂ ~ IC₆ 分别组成 5 个有源带通滤波器。
- ④ 集成电路 IC₇ ~ IC₁₁ 分别组成 5 个 LED 电平表。一个有源带通滤波器和一个 LED 电平表配合，共组成 5 路频率点电平显示器。图 10-33 为整机电路方框图。

整机工作原理是：音箱播放的声音信号由话筒 BM 接收，并转换为电信号经集成运放 IC₁ 放大后，同时送入 5 个有源带通滤波器。每个带通滤波器只允许特定频率范围的信号通过。

以第 1 路为例，带通滤波器 IC₂ 从音频信号中选出 100Hz（含一定带宽，下同）的信号，送入 IC₇ 组成的五级 LED 电平表，使 LED 光柱随 100Hz 信号电平的大小而高低变化。同理，第 2 路 ~ 第 5 路分别显示 300Hz、1kHz、3kHz、10kHz 信号的电平。

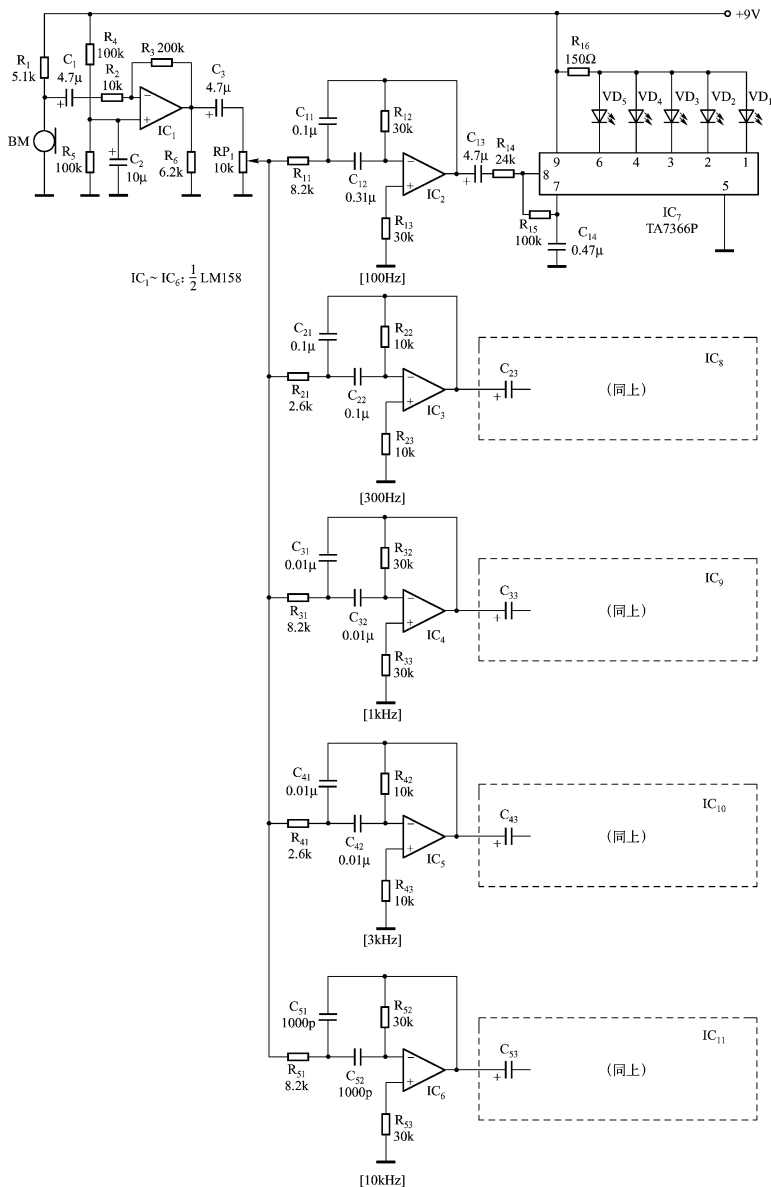


图 10-32 外置式音频频谱显示器电路图

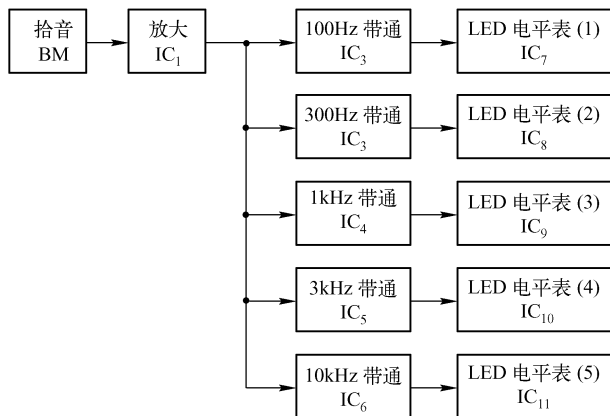


图 10-33 外置式音频频谱显示器整机电路方框图

5 个频率点的电平光柱排在一起，即可模拟出一幅动态的频谱图。



10.6.2 有源带通滤波器电路分析

$IC_2 \sim IC_6$ 分别组成 5 个有源带通滤波器。带通滤波器顾名思义，是只允许频率在通频带 Δf 范围内的信号通过，高于上限截止频率 f_H 和低于下限截止频率 f_L 的信号均被阻止。

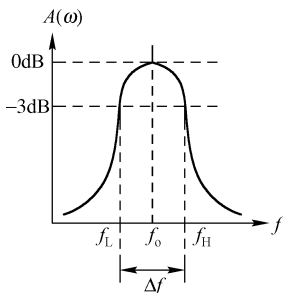


图 10-34 带通滤波器频率特性曲线

带通滤波器的频率特性曲线如图 10-34 所示。 f_0 为中心频率。当信号频率等于 f_0 时输出最大，高于或低于 f_0 时输出均下降。曲线中， f_0 两边输出下降至 -3dB 的两点，分别定义为上限截止频率 f_H 和下限截止频率 f_L ， $f_H - f_L = \Delta f$ 即为通频带。

带通滤波器一般可由 R、C、L 等无源元件组成，如电路中包含晶



极管、集成运放等有源元器件，则称为有源带通滤波器。采用集成运放的有源带通滤波器，具有输入阻抗高、输出阻抗低、体积小、重量轻、滤波效果好的优点。

下面以如图 10-32 所示电路中第 1 路为例，说明有源带通滤波器的工作原理。

集成运放 IC_2 与 R_{11} 、 R_{12} 、 C_{11} 、 C_{12} 等组成二阶多路反馈带通滤波器，中心频率 $f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_{11}R_{12}C_{11}C_{12}}}$ 。在集成运放 IC_2 的输出端与反相输入端之间共有两条反馈回路。

① R_{11} 与 C_{11} 组成低通负反馈回路，频率越高，负反馈量越大，输出信号越小，转折频率为 f_H ，高于 f_H 的信号即认为被阻止。

② C_{12} 与 R_{12} 组成高通负反馈回路，频率越低，负反馈量越大，输出信号越小，转折频率为 f_L ，低于 f_L 的信号即认为被阻止。

两条反馈回路共同作用的结果是，只有在 f_H 与 f_L 之间的信号（即通频带内的信号）得以通过 IC_2 ，其余均被阻止，实现了“带通”。

考虑到本电路中带通滤波器需要有足够的带宽，设计时取其 Q 值为“1”。改变带通滤波器负反馈回路元件 R_{11} 、 R_{12} 、 C_{11} 、 C_{12} 的值即可改变中心频率 f_0 ，改变 R_{12} 与 R_{11} 的比值即可改变其 Q 值，因此可以很方便地设计出不同 f_0 和不同 Q 值的带通滤波器。 R_{13} 为集成运放同相输入端平衡电阻。

10.6.3 电压比较器电路分析

将信号电平的大小转换为 LED 光柱的高低，需要用到电压比较器。采用集成运放构成的电压比较器如图 10-35 所示。参考电压 U_R 接在集成运放 IC 的同相输入端，输入信号 U_i 接在 IC 的反相输入端。当输入信号 $U_i < \text{参考电压 } U_R$ 时，输出端 $U_o = 1$ ，发光二极管 VD 不亮；当 $U_i > U_R$ 时，输出端 $U_o = 0$ ，发光二极管 VD 点亮。

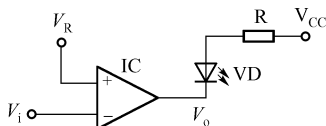


图 10-35 采用集成运放构成的电压比较器

▶▶ 10.6.4 集成电平表驱动电路分析

$IC_7 \sim IC_{11}$ 均采用 LED 电平表驱动电路 TA7366P。图 10-36 为 TA7366P 内部电路结构示意图。

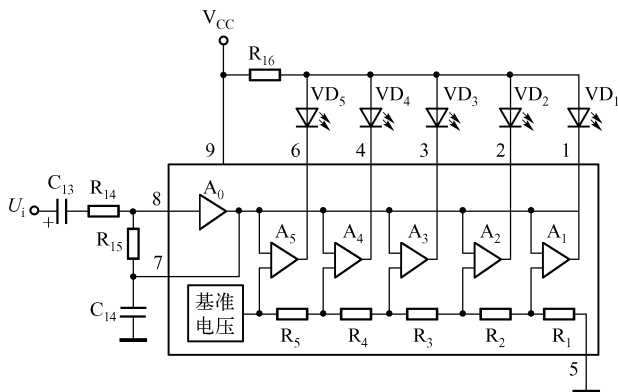


图 10-36 TA7366P 内部电路结构示意图

TA7366P 内部 A_0 为电压放大器，对输入信号进行适当放大，放大倍数等于外接电阻 R_{15} 与 R_{14} 的比值，并可通过改变 R_{14} 或 R_{15} 的阻值进行调节。 $A_1 \sim A_5$ 为电压比较器，其参考电压分别取自基准电压在内部电阻 $R_1 \sim R_5$ 上的压降， A_5 的参考电压最高， A_1 的参考电压最低，并按 0dB、-3dB、-6dB、-11dB、-16dB 的阶梯排列。

当输入信号 U_i 大于 A_1 的参考电压时，发光二极管 VD_1 点亮；当 U_i 大于 A_2 的参考电压时， VD_1 与 VD_2 点亮；依此类推。可见，发光二极管点亮的个数与输入信号电平的高低成正比。将 $VD_1 \sim VD_5$ 垂直向上排列成为光柱，发光光柱的高低即表示了输入信号电平的高低。采用 LED 电平表驱动集成电路，大大简化



了电路结构，提高了可靠性。

制作时，在结构上可将5路、每路5个发光二极管排列成矩阵状，如图10-37所示。整个电路可置于一只立起的扁平外壳中，发光二极管矩阵置于前面板上，话筒BM应朝向后方。9V电源可用电池或外接整流电源。可制作两只相同的外置式音频频谱显示器，分别用于左右声道。

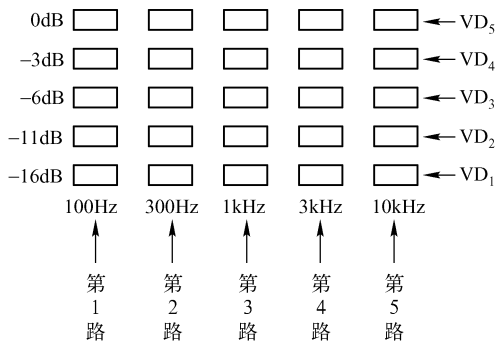


图 10-37 发光二极管矩阵

使用时，将外置式音频频谱显示器置于音箱前，调节灵敏度电位器 RP_1 ，使发光二极管矩阵随音乐信号动态显示即可。如调节 RP_1 的阻值仍不能获得满意的灵敏度，则可适当增大或减小 R_3 的阻值，以提高或降低 IC_1 的增益。



10.7 怎样看数字抢答器电路图

抢答器是知识竞赛等活动中常用的设备。抢答器的功能是鉴别和指示出各参与者中第一个按下按钮者，即鉴别出一组数据中的第一个到来者，利用 D 触发器可以实现这个功能。



10.7.1 电路原理总体分析

数字4路抢答器的电路图如图10-38所示。我们知道，抢答

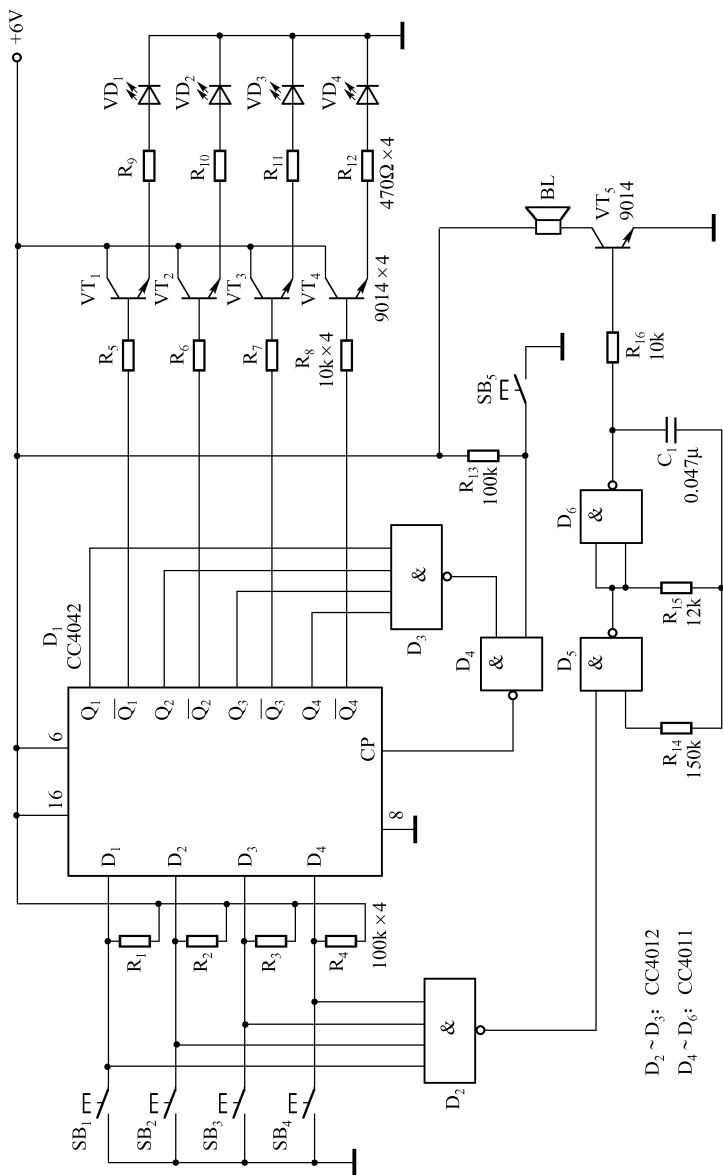


图 10-38 数字 4 路抢答器的电路图

D₂~D₃: CC4012
D₄~D₆: CC4011



器的功能是对第一个按下抢答按钮者做出鉴别,并用声光指示出鉴别结果。因此在电路图中,左边抢答按钮 $SB_1 \sim SB_4$ 为输入端,右边发光二极管 $VD_1 \sim VD_4$ 和扬声器 BL 为输出端,信号处理走向为从左到右。

抢答器电路图中的主要元器件是 D 触发器、与非门和晶体管等,可以这些主要元器件为核心,划分出抢答器电路的主要单元电路。

① 按钮开关 $SB_1 \sim SB_4$ 和电阻 $R_1 \sim R_4$ 等组成的抢答按钮电路。其功能是提供抢答器的输入操作部件。

② 集成 D 触发器 D_1 、与非门 D_3 和 D_4 等组成的第一信号鉴别电路。其功能是从多路输入中鉴别出第一个按下的按钮信号。

③ 晶体管 $VT_1 \sim VT_4$ 和发光二极管 $VD_1 \sim VD_4$ 等组成的发光指示电路。其功能是指示出第一信号鉴别结果。

④ 按钮开关 SB_5 和电阻 R_{13} 等组成的复位电路。其功能是使抢答器电路复位以便进行新一轮抢答。

⑤ 与非门 D_2 、 D_5 和 D_6 等组成的门控多谐振荡器。其功能是为声音提示电路提供信号源。

⑥ 晶体管 VT_5 和扬声器 BL 等组成的声音提示电路。其功能是发出提示音。

整机电路包含两个信号通道,抢答按钮电路、第一信号鉴别电路、发光指示电路和复位电路组成主要的信号通道,门控多谐振荡器和声音提示电路组成辅助电路通道。图 10-39 为电路原理方框图。

电路总的工作原理如下。

平时,抢答按钮 $SB_1 \sim SB_4$ 都未被按下时,抢答器处于待机状态,发光二极管 $VD_1 \sim VD_4$ 均不亮。

抢答开始,参赛者按下抢答按钮。首先被按下的按钮(如 SB_1)使其对应的 D 触发器翻转,并使所有 D 触发器进入数据锁存状态,电路对在此时间以后的信号便不再响应,也就是其

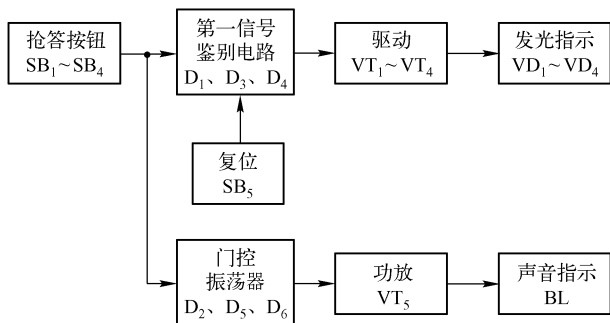


图 10-39 数字 4 路抢答器电路原理方框图

他抢答按钮不再有效。同时发光二极管 VD_1 发光，指示出 SB_1 抢得了发言权。

一轮抢答结束后，主持人按下复位按钮 SB_5 ，使电路又回复到待机状态，为新一轮抢答做好准备。

10.7.2 第一信号鉴别电路分析

第一信号鉴别电路的核心是集成四锁存 D 触发器 CC4042

(如图 10-38 所示电路图中的 D_1)。

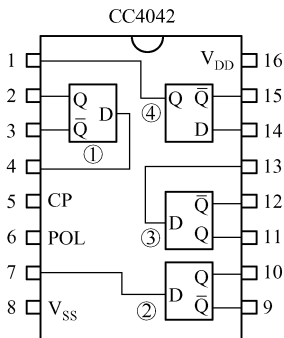


图 10-40 CC4042 的引脚功能

CC4042 内含 4 个独立的锁存型 D 触发器。它们共用时钟脉冲端 CP 和极性选择端 POL。只有当 CP 与 POL 逻辑状态相同时，D 端数据才被传输至 Q 端，否则数据被锁存。其引脚功能如图 10-40 所示。

电路图中，CC4042 的 POL 端 (D_1 的 6 脚) 固定处于“1”电平状态，数据的传输或者锁存便由 CP 脉冲的极性所决定，CP = 1 时传输数

据，CP = 0 时锁存数据。根据这一原理即可用 CC4042 来实现抢答器的功能。



第一信号鉴别电路工作原理可用图 10-41 来说明。CC4042 中的 4 个 D 触发器的数据输入端 $D_1 \sim D_4$ 分别受抢答按钮 $SB_1 \sim SB_4$ 控制, 按钮未按下时为“1”, 按钮按下时为“0”。4 个反相输出端 $\bar{Q}_1 \sim \bar{Q}_4$ 反映鉴别结果, 平时均为“0”, 鉴别到第一信号时相应的反相输出端为“1”。

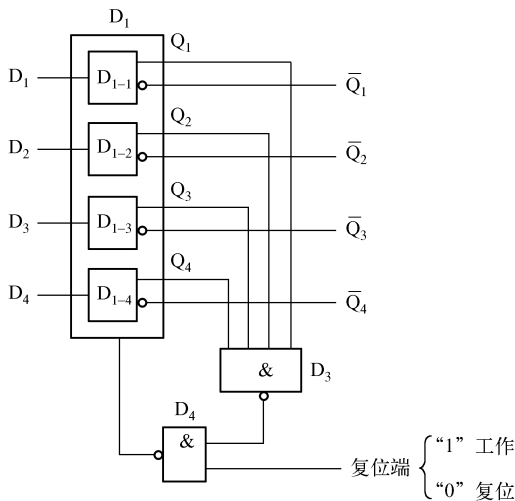


图 10-41 第一信号鉴别电路工作原理

① 在待机状态下, 因为抢答按钮 $SB_1 \sim SB_4$ 都未被按下, 4 个 D 触发器的数据输入端 $D_1 \sim D_4$ 均为“1”。又因为这时各 D 触发器共用的时钟脉冲 $CP = 1$, D 触发器处于数据传输状态, 所以 D 端数据传输至 Q 端, 4 个 D 触发器的输出端 $Q_1 \sim Q_4$ 均为“1”, 反相输出端 $\bar{Q}_1 \sim \bar{Q}_4$ 均为“0”。

② 在抢答开始时, 设抢答按钮 SB_1 首先被按下, 使 D_{1-1} 触发器的数据输入端 D_1 变为“0”, 其输出端 $Q_1 = 0$, 使与非门 D_3 输出为“1”, 与非门 D_4 输出为“0”, 即 $CP = 0$, D 触发器处于数据锁存状态, 电路对在此时间以后的信号便不再响应, 也就是其他抢答按钮不再有效。同时 $\bar{Q}_1 = 1$, 表示鉴别到的第一信号。



10.7.3 发光指示电路分析

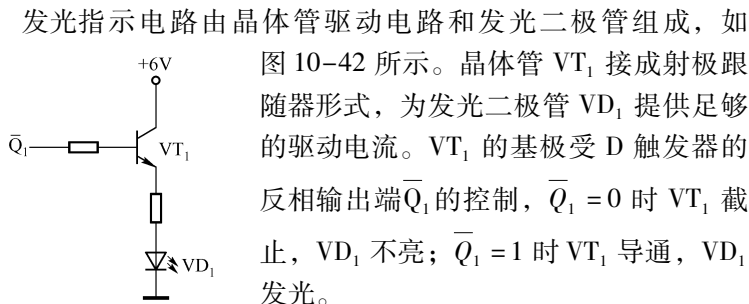


图 10-42 发光指示电路

对应于 4 个抢答按钮，发光指示电路也有 4 套， $VT_1 \sim VT_4$ 的基极分别受 $\bar{Q}_1 \sim \bar{Q}_4$ 控制，如图 10-38 所示。例如，当第一信号鉴别电路鉴别到抢答按钮 SB_1 首先被按下时， $\bar{Q}_1 = 1$ ， VT_1 导通驱动发光二极管 VD_1 发光，指示出 SB_1 抢得了发言权。

10.7.4 复位电路分析

复位按钮 SB_5 控制复位端的状态如图 10-41 所示。正常工作时复位端为“1”，复位按钮按下时复位端为“0”。

一轮抢答结束后，主持人按下复位按钮 SB_5 ，使与非门 D_4 输出为“1”，即 $CP = 1$ ，D 触发器又进入数据传输状态，使 4 个 D 触发器回复到 $Q_1 \sim Q_4$ 均为“1”、 $\bar{Q}_1 \sim \bar{Q}_4$ 均为“0”的待机状态，为新一轮抢答做好准备。

10.7.5 声音提示电路分析

声音提示电路包括门控多谐振荡器和音频功放，为抢答器提供按键音。电路原理如图 10-43 所示，与非门 D_5 、 D_6 组成门控多谐振荡器， D_5 的 A 输入端为门控端。 $A = 0$ 时电路停振， $A = 1$ 时电路起振。

多谐振荡器门控端 A 受与非门 D_2 控制， D_2 的 4 个输入端分

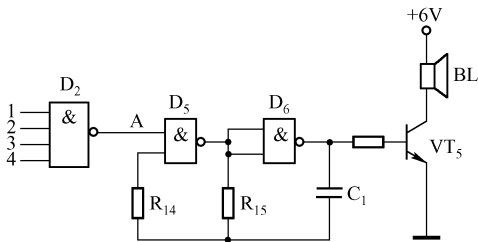


图 10-43 声音提示电路原理

别由抢答按钮 $SB_1 \sim SB_4$ 控制。 $SB_1 \sim SB_4$ 都未按下时， D_2 的 4 个输入端均为“1”， D_2 输出端为“0”（即 $A = 0$ ）。当 $SB_1 \sim SB_4$ 中有任一个被按下时， D_2 输出端即为“1”（即 $A = 1$ ），电路起振， D_6 输出约 800Hz 的脉冲方波，经晶体管 VT_5 放大并驱动扬声器发声，提示抢答成功。



10.8 怎样看模拟环绕声处理器电路图

用多声道（如 5 声道）高保真音响设备聆听具有空间环绕信息的音乐软件，可给人一种身临其境的临场感。但对广大业余爱好者来说，模拟环绕声技术更具诱惑力。这一方面是因为现有的音乐软件（磁带、CD、VCD 碟片、调频广播等）大多数仍是普通双声道立体声；另一方面也因为多声道高保真音响设备价格昂贵，而现有双声道音响设备又不能弃之不用。因此，模拟环绕声理论和技术应运而生了。典型的是依据 HRTF 理论建立的 SRS 技术及其芯片。

下面介绍一款根据 SRS 技术原理设计的模拟环绕声处理器，能够对普通双声道立体声音源进行处理后形成环绕立体声，仅用两只音箱即可营造出三维空间音响效果。由于采用通用集成运放，故元器件易购、造价低廉、工作稳定、效果良好，适合业余爱好者自制。



10.8.1 整机电路分析

图 10-44 为模拟环绕声处理器电路图。该图的信号处理走向比较容易识别, 电路左边 L_i 、 R_i 是模拟环绕声处理器的输入端, 右边 L_o 、 R_o 是处理器的输出端, 信号处理走向为通常的从左到右。电路的总体功能是, 将从 L_i 、 R_i 端输入的普通立体声信号处理成为包含有环绕声信息和中置声信息的左、右声道信号, 从 L_o 、 R_o 端输出至功放级。

根据前面的介绍, 分析复杂电路应依据主要元器件将电路分解为若干个功能单元。模拟环绕声处理器电路中一共使用了 8 个集成运算放大器, 故可据此将整个电路进行分解, 画出如图 10-45 所示的方框图, 这将有助于对整个电路进行分析。

对照方框图可以看出, 电路图从左到右依次有以下组成部分。

- ① 集成运放 IC_{1-1} 、 IC_{1-2} 分别构成的左、右声道缓冲器。
- ② IC_{1-3} 构成的产生环绕声的减法器。
- ③ IC_{1-4} 构成的产生中置声的加法器。
- ④ IC_{2-1} 等构成的有源频率补偿网络。
- ⑤ IC_{2-2} 构成的反相器。
- ⑥ IC_{2-3} 、 IC_{2-4} 分别构成的左、右声道加法器。

整机工作原理如下。

由 CD 机、录音机、录像机、收音机、电视机等音源设备提供的普通双声道立体声音频信号, 分别从 L_i 、 R_i 端输入, 经 IC_{1-1} 和 IC_{1-2} 构成的两个电压跟随器缓冲后, L 、 R 信号均分成三路。

一路 L 、 R 信号分别直接送入各自的加法器 IC_{2-3} 、 IC_{2-4} 。

另一路 L 、 R 信号送入减法器 IC_{1-3} 相减, 得到 $R-L$ 信号, 再经 IC_{2-1} 等构成的有源频率补偿网络对信号进行频谱修正处理并倒相后, 得到 $f(L-R)$, 这就是环绕声信号。 $f(L-R)$ 信号

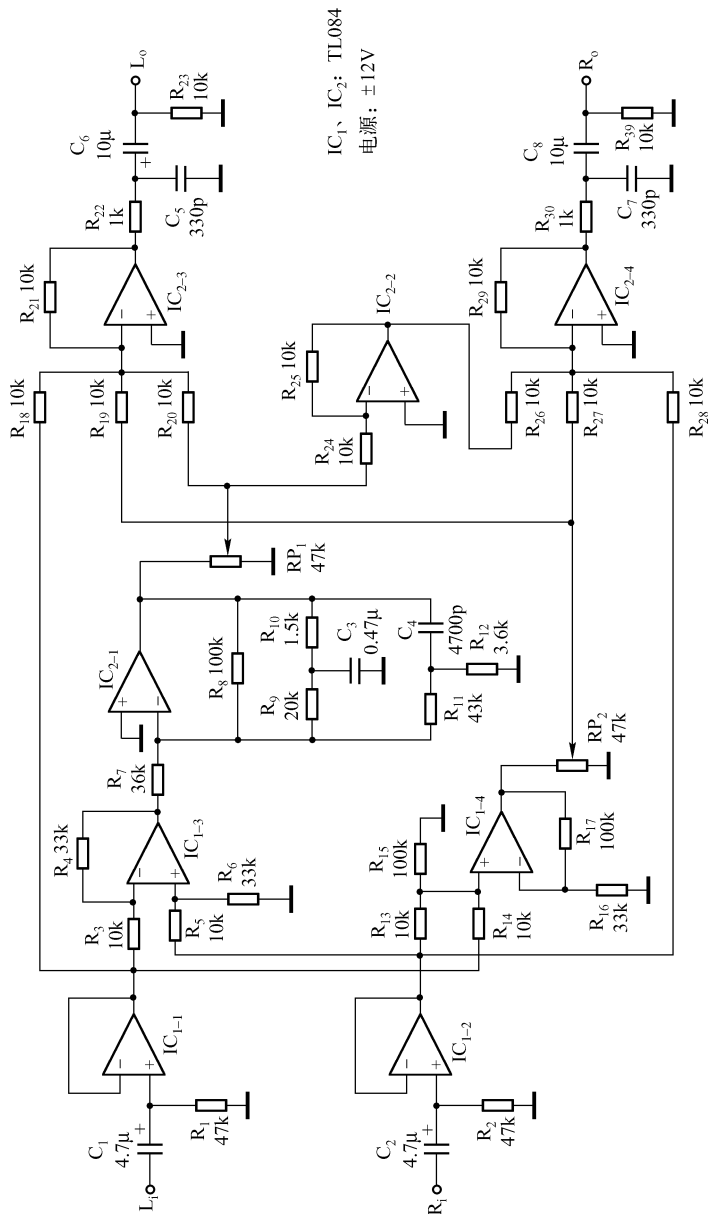


图 10-44 模拟环绕声处理器电路图

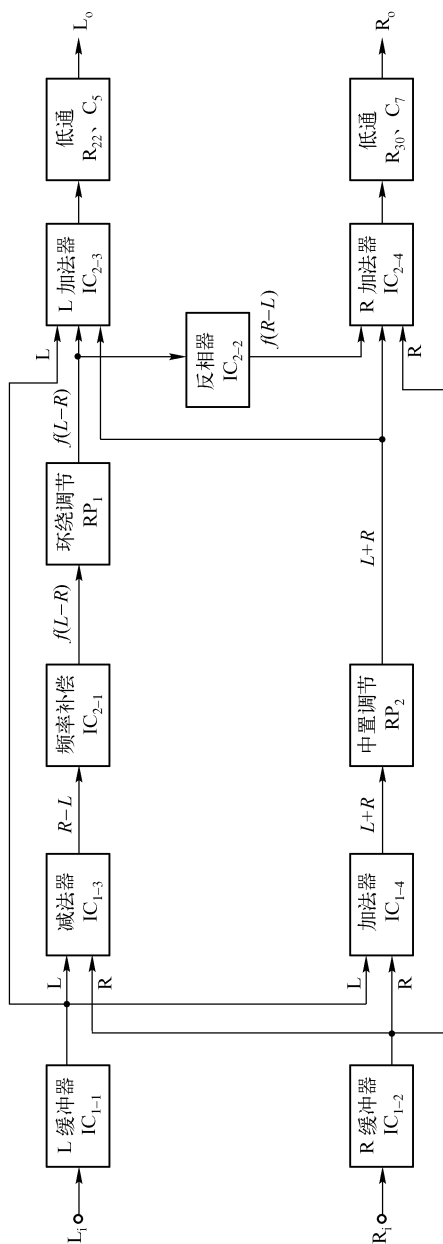


图 10-45 模拟环绕声处理器原理方框图



又分成两路：一路直接送入 L 加法器 IC_{2-3} ；另一路经反相器 IC_{2-2} 倒相后成为 $f(R-L)$ 再送入 R 加法器 IC_{2-4} 。电位器 RP_1 可调节环绕声的分量，即调节三维音场的空间感强度。

第三路 L 、 R 信号送入加法器 IC_{1-4} 相加，得到 $L+R$ 信号，这就是中置声道信号，分别送入左、右声道加法器 IC_{2-3} 和 IC_{2-4} 。电位器 RP_2 用于调节中置声音的强度。

以上各种信号分别在左、右声道加法器中最终形成包含有环绕声信息和中置声信息的新的左、右声道信号 L_o 和 R_o ，如图 10-46 所示。



图 10-46 新的 L 、 R 信号的形成

左声道：左声道原始信号 L 、环绕声信号 $f(L-R)$ 、中置声信号 $L+R$ 三者经 IC_{2-3} 相加后，经 R_{22} 、 C_6 输出为 L_o 。

右声道：右声道原始信号 R 、环绕声信号 $f(R-L)$ 、中置声信号 $L+R$ 三者经 IC_{2-4} 相加后，经 R_{30} 、 C_8 输出为 R_o 。

C_5 与 R_{22} 、 C_7 与 R_{30} 分别组成 L 、 R 低通滤波器，滤除不必要的高频成分。新的左、右声道信号 L_o 和 R_o 经功放后推动左右两只音箱即可产生具有包围感的三维立体声场。

10.8.2 集成运放电压跟随器电路分析

集成运算放大器实质上是一个高增益的多级直接耦合放大器，具有很大的开环电压放大倍数（一般可达 10^5 ，即 100dB 以上）和极高的输入阻抗（可达 $10^6\Omega$ ，采用场效应管输入级的可达 $10^9\Omega$ 以上）。集成运放使用中一般加入深度负反馈，由于其开环增益很大，闭环增益仅由反馈电阻决定。

集成运放通常有 3 种基本接法。

① 反相输入放大器。输出信号 U_o 与输入信号 U_i 相位相反，



放大倍数 $A = \frac{U_o}{U_i} \approx -\frac{R_f}{R_1}$ ，如图 10-47 (a) 所示。

② 同相输入放大器。输出信号 U_o 与输入信号 U_i 相位相同，放大倍数 $A = \frac{U_o}{U_i} \approx 1 + \frac{R_f}{R_1}$ ，如图 10-47 (b) 所示。

③ 电压跟随器。输出信号 U_o 与输入信号 U_i 相位相同，放大倍数 $A \approx 1$ ，如图 10-47 (c) 所示。将图 10-47 (c)、(b) 比较可见，电压跟随器就是 $R_f = 0$ 、 $R_1 = \infty$ 、反馈系数 $F = 1$ 时的同相输入放大器。

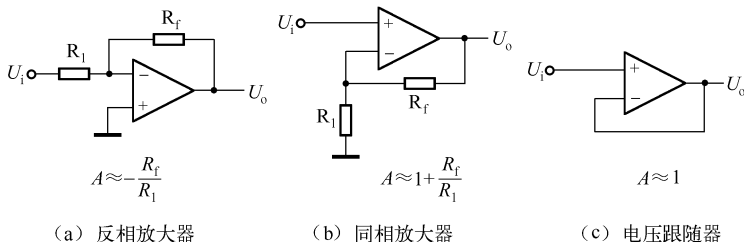


图 10-47 集成运放的三种基本电路

由于集成运放本身的高增益特性，因此用集成运放构成的电压跟随器具有极高的输入阻抗，几乎不从信号源汲取电流。同时具有极低的输出阻抗，向负载输出电流时几乎不在内部引起压降，可视为电压源。

集成运放电压跟随器的性能非常接近理想状态，并且无外围元件、无须调整，这是晶体管电压跟随器（射级跟随器）所无法比拟的。在如图 10-44 所示电路图中， IC_{1-1} 、 IC_{1-2} 构成两个电压跟随器，分别作为 L、R 声道的输入缓冲级。

10.8.3 减法器与加法器电路分析

减法器 and 加法器分别用于形成“ $R - L$ ”和“ $L + R$ ”信号，以产生模拟的环绕声和中置声，加法器还用于新的 L、R 声道输出信号的合成。



(1) 减法器

用集成运放构成的减法器如图 10-48 所示。这里采用差动输入方式，作为减数的输入量 U_1 接入集成运放的反相输入端，作为被减数的输入量 U_2 接入集成运放的同相输入端，其输出电压 $U_o = \frac{R_f}{R_1} (U_2 - U_1)$ 。当 $R_f = R_1$ 时， $U_o = (U_2 - U_1)$ ，完成减法运算。 $\frac{R_f}{R_1} = A$ 为放大系数。

由于集成运放具有很高的开环电压放大倍数，又采用深度负反馈，所以集成运放减法器具有很高的运算精度和稳定性。在如图 10-44 所示电路图中， IC_{1-3} 构成减法器的增益约为 10dB ($A=3.3$ 倍)，将 R 、 L 信号相减得到“ $R-L$ ”信号。

R_{10} 、 C_3 、 R_9 和 C_4 、 R_{12} 、 R_{11} 等组成阻容网络，作为集成运放 IC_{2-1} 的反馈回路，形成有源频率补偿电路。其低频转折频率为 300Hz、高频转折频率为 10kHz，如图 10-49 所示，对减法器输出的 $R-L$ 信号进行听音频谱修正，以便得到环绕声信号 $f(L-R)$ 。

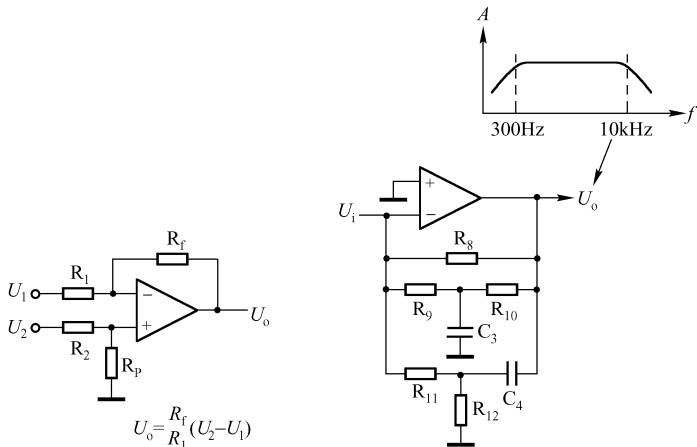


图10-48 用集成运放构成的减法器

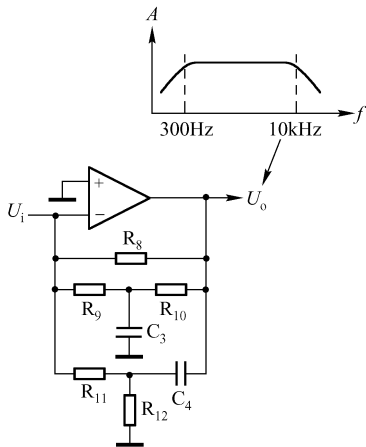
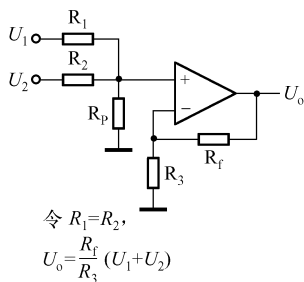


图 10-49 频率补偿电路

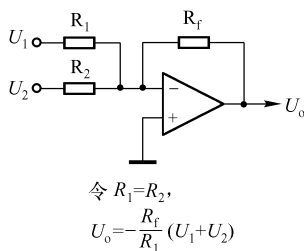


(2) 加法器

用集成运放构成的加法器有同相加法器和倒相加法器两种接法，如图 10-50 所示。



(a) 同相加法器



(b) 倒相加法器

图 10-50 加法器电路

在同相加法器中，两个相加的输入量 U_1 和 U_2 同时接入集成运放的同相输入端，令 $R_1 = R_2$ ，则其输出电压 $U_o = \frac{R_f}{R_3} (U_1 + U_2)$ 。当 $R_f = R_3$ 时， $U_o = (U_1 + U_2)$ ，完成了加法运算。 $\frac{R_f}{R_3} = A$ 为放大系数。

在倒相加法器中，两个相加的输入量 U_1 和 U_2 同时接入集成运放的反相输入端，其输出电压 $U_o = -\frac{R_f}{R_1} (U_1 + U_2)$ 。当 $R_f = R_1$ 时， $U_o = -(U_1 + U_2)$ 。 $\frac{R_f}{R_1} = A$ 为放大系数。

与集成运放减法器一样，集成运放加法器也具有很高的运算精度和稳定性。在如图 10-44 所示电路图中共有 3 个加法器。其中， IC_{1-4} 构成同相加法器，增益约 10dB ($A = 3$ 倍)，将 L 、 R 信号相加得到中置声信号 $L + R$ 。 IC_{2-3} 、 IC_{2-4} 构成两个倒相加法器，增益为 0dB ($A = 1$ 倍)，分别作为左、右声道的加法器。



10.8.4 集成运放反相器电路分析

在如图 10-47 (a) 所示反相输入放大器中, 当 $R_f = R_1$ 时, 增益为 0dB ($A = 1$ 倍), 这时就成为集成运放反相器, 其输出电压 U_o 与输入电压 U_i 相位相反、大小相等, 如图 10-51 所示。由于送入 R 加法器相加的环绕声信号应为 $f(R-L)$, 因此需要一级反相器将 $f(L-R)$ 信号倒相。在如图 10-44 所示电路图中, IC₂₋₂ 就是一个集成运放反相器。

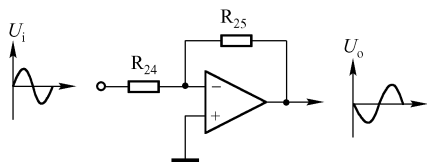


图 10-51 集成运放反相器

10.8.5 直流供电电路分析

读者也许已经注意到, 在如图 10-44 所示电路图中并没有画出直流供电电路。这是一种约定俗成的习惯画法, 即集成运放的正、负电源接线不必画出, 但不等于没有。完整的画法如图 10-52 所示。初学者朋友应逐渐熟识这种画法, 分析电路时别忘了还有直流供电回路, 制作时更不能忘记接入正、负电源接线。整机使用 $\pm 12V$ 电源, 可由稳压电源提供, 也可自制电源电路。

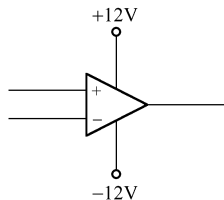


图 10-52 集成运放的电源接线

在放音系统中, 模拟环绕声处理器应置于音调、音量控制电路之前, 如图 10-53 所示, 以免改变音调、音量时影响环绕声处理效果。

试用时, 可先将环绕声调节电位器 RP_1 、中置声调节电位器



RP_2 分别置于中间位置，放送立体声音乐节目，根据主观听音感觉，调节 RP_1 的阻值使环绕效果（空间感）令人满意，再调节 RP_2 的阻值使中置声与环绕声的比例适当。以后使用时一般可不再变动 RP_1 、 RP_2 这两个电位器的阻值。

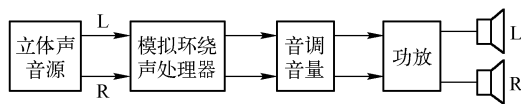


图 10-53 模拟环绕声处理器的应用